

Онтологии больших данных, машинного обучения и искусственного интеллекта на цифровой железной дороге

В.С. Лазуткина, А.А. Климов, В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, О.Н. Покусаев

Аннотация – Настоящая статья посвящена использованию онтологий в проектах цифровой железной дороги. Онтология – это систематическая классификация предметных знаний, которая поддерживает использование различных баз данных осмысленным образом. Железнодорожные перевозки стали областью, в которой производительность все больше зависит от имеющейся способности извлекать информацию из сложных наборов данных, а также принимать оптимальные решения в режиме реального времени. Поэтому эффективное управление информацией и данными жизненно важно для железной дороги, которая является тесно связанной онтологической системой систем, где изменения в любой части могут иметь значительные последствия в других местах. Например, онтология является одним из важных факторов реализации проекта анализа рисков больших данных (BDRA) для железных дорог. Целью BDRA является поддержка анализа рисков и принятие решений по безопасности из широкого спектра источников данных, а также для улучшения управления рисками безопасности на железных дорогах. В качестве примера в работе рассмотрено онтологическое проектирование для проекта цифровой железной дороги Rail Baltica. Отмечается большая роль искусственного интеллекта и систем на базе машинного обучения. Также в работе показано, что для того, чтобы в полной мере использовать эти новые технологии, железнодорожная отрасль должна пересмотреть свой подход к сбору и хранению данных и выбрать правильный набор онтологий.

Ключевые слова — цифровая железная дорога, онтология, искусственный интеллект.

I. ВВЕДЕНИЕ

Вопросам онтологий, искусственного интеллекта (ИИ) и больших данных в применении к железнодорожному транспорту в зарубежных и

Статья получена 10 апреля 2019 г.

В.С.Лазуткина – Российская академия транспорта (РАТ) (email: v.lazutkina@vsmexpert.ru)

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

В.П.Куприяновский - Национальный центр компетенций в области цифровой экономики МГУ имени М.В. Ломоносова; РУТ (МИИТ) (e-mail: vpkupriyanovsky@gmail.com)

Д.Е.Намиот - МГУ имени М.В. Ломоносова; РУТ (МИИТ) (e-mail: dnamiot@gmail.com)

О.Н.Покусаев - Центр цифровых высокоскоростных транспортных систем РУТ (МИИТ) (email: o.pokusaev@rut.digital)

российских исследованиях уделяется значительное внимание [1 - 8]. Железнодорожные операции - это та область, в которой производительность все больше зависит от нашей способности извлекать информацию из сложных наборов данных и принимать оптимальные решения в режиме реального времени.

Эффективное управление информацией и данными жизненно важно для железной дороги, тесно связанной онтологической системой систем [1], где изменения в любой части могут иметь значительные последствия в других местах [1]. В формализованной онтологии [3-5] управление информацией осуществляется либо с помощью построения системы выравнивания понятий и соответственно выравнивания семантических репозиторий, и без единой базовой онтологии, нет общения с общепризнанным значением, которое подрывает междоменную функциональность. Онтологии используются в процессе программирования как форма представления знаний о реальном мире или его части. Основные сферы применения — моделирование бизнес-процессов, семантическая паутина (англ. Semantic Web) [27], искусственный интеллект. Хотя термин «онтология» изначально философский, в информатике он принял самостоятельное значение. Здесь есть два существенных отличия:

- Онтология в информатике должна иметь формат, который компьютер сможет легко обработать;
- Информационные онтологии создаются всегда с конкретными целями — решения конструкторских задач; они оцениваются больше с точки зрения применимости, чем полноты.

Специализированные (предметно-ориентированные) онтологии — это представление какой-либо области знаний или части реального мира. В такой онтологии содержатся специальные для этой области значения терминов. К примеру, слово «поле» в сельском хозяйстве означает участок земли, в физике — один из видов материи, в математике — класс алгебраических систем. Общие онтологии используются для представления понятий, общих для большого числа областей. Такие онтологии содержат базовый набор терминов, глоссарий или тезаурус, используемый для описания терминов предметных областей. Если использующая специализированные онтологии система развивается, то может потребоваться их объединение. Подзадачей объединения онтологий является задача отображения онтологий. И для инженера по онтологиям это серьезная задача. Онтологии даже близких областей

могут быть несовместимы друг с другом. Обычно наряду с верхними или общими онтологиями широко используются цифровые таксономии.

Таксономия — учение о принципах и практике классификации и систематизации сложно организованных иерархически соотносящихся сущностей которыми оперирует онтологии. Принципы таксономии применяются во многих научных областях знаний, для упорядочивания объектов географии, геологии, языкознания, этнографии и всего многообразия физического мира.

II. ОНТОЛОГИЯ И ПУНКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ПОЕЗДОВ

Человеку, не знакомому с предметной областью железной дороги, трудно даже предположить, как много существует разных факторов, влияющих на время пребывания поездов. Полезная схема, показывающая некоторые из множества различных влияющих факторов, связанных со временем пребывания показана на рисунке 1. Она взята из работы [9], которая называется: «Оценка времени пребывания поезда на коротких остановках на основе данных о событиях в пути: исследование на голландском железнодорожном вокзале».

На этом рисунке мы видим пять онтологических доменов три из которых (станция, подвижной состав, операции) могут считаться чисто железнодорожными онтологическими доменами, и два (пассажир и внешние условия), которые стоит рассматривать как внешние онтологические домены.

Так как уже сегодня возможно собирать данные непрерывно для приведенного нами примера то их объемы стали огромными и образуют большие данные [15] железнодорожного транспорта (рисунок 2).

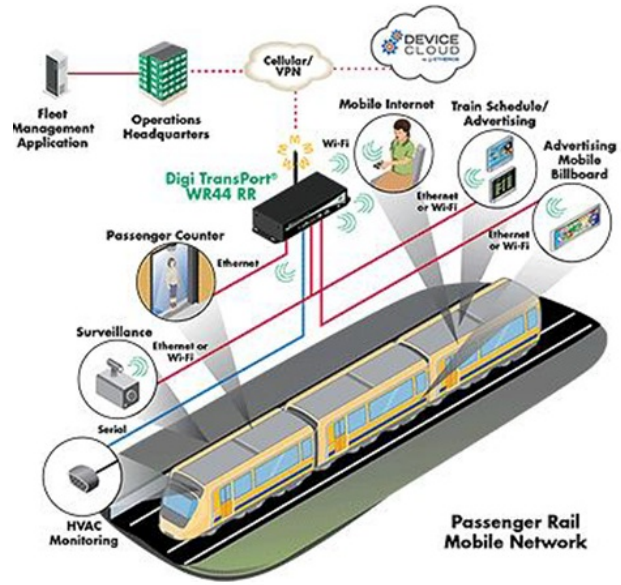


Рис. 2. Большие данные, задействованные в работе железнодорожного транспорта [15].

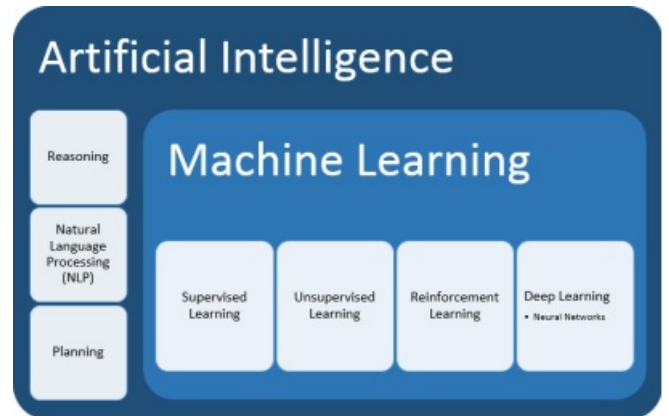


Рис. 3. AI - это общая категория, которая включает в себя машинное обучение и обработку естественного языка [16]

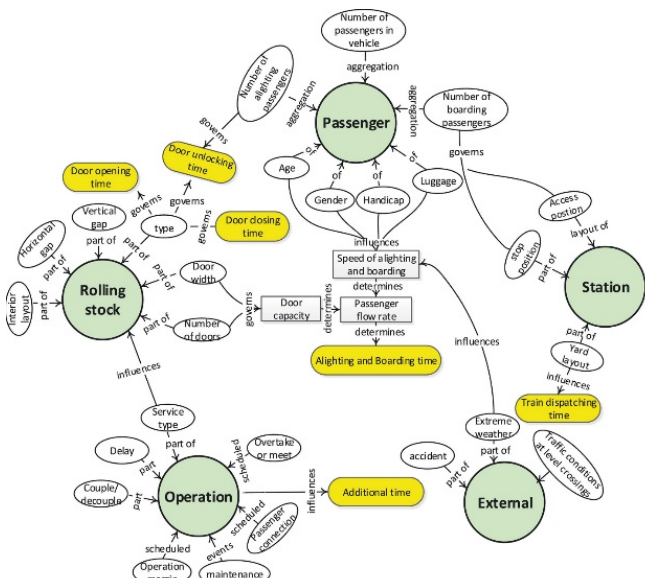


Рис.1. Что влияет на время прибытия поезда (Источник рисунка -https://www.rssb.co.uk/PublishingImages/horizon-scanning/many-different-influencing-factors-related-to-dwell-time.png)

Для дальнейшего изложения мы выбрали наиболее понятный рисунок 3 о связи AI, ML и NPL.

Практическим примером использования теоретических концепций изложенных выше является то, как в 2016 году японский гигант ИКТ Fujitsu в сотрудничестве с калифорнийской компанией SRI International добавил функцию прогнозирования времени задержки поезда с использованием технологии машинного обучения ИИ к приложению Jogudan Norikae Annai, которое обеспечивает планирование маршрутов общественного транспорта и информация о тарифах для клиентов в регионе Канто с учетом данных из различных онтологических доменов.

Движок Fujitsu извлекает уроки из предыдущих задержек, объединяет их с прошлыми эксплуатационными данными, а затем делает точные прогнозы задержек на основе машинного обучения. Затем он может отображаться для клиента через веб-сайты и мобильные приложения и может принести потенциальные выгоды для управления и восстановления любых услуг, что зависит от прогнозирующего воздействия задержек. Краткое

описание пробной системы Fujitsu приводится на рисунке 4.

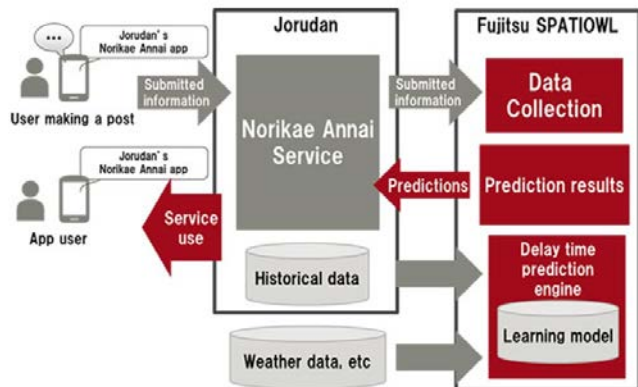


Рис.4. Краткое описание пробной системы Fujitsu (Источник: <https://phys.org/news/2016-07-fujitsu-field-trial-ai-based.html#jCp>)

Однако онтологическая картина даже в случае примера прибытия поезда может стать значительно более динамичной при переходе к цифровым железным дорогам, планы по которым базируются на европейской системе сигнализации и управления ERTMS и сегодня осуществляются на как на уровне ЕС (общеевропейские железнодорожные транспортные коридоры – TEN-T) так и на национальном уровне. В последнем случае речь идет, например, о программах перехода на цифровую железную дорогу в Великобритании Нидерландах Дании и Норвегии.

Для обработки огромного объема разнородных и реального времени больших железнодорожных данных требуется не только их связать по доменам через онтологию и семантику с добавлением возможностей их репозиторного хранения, но и построить систему цифровых словарей или таксономии, и использовать AI (рисунок 3) для того, чтобы не только иметь возможность точно-во-время (JIT) обслуживать собственно железную дорогу, но и осуществлять ее информационное взаимодействие в онтологической архитектуре JIT с другими доменами, которые связаны стабильными бизнес процессами с железной дорогой. Так как онтологий на практике реализуется через соответствующие модели предметных областей или доменов то она имеет название – «Архитектура управляемая моделями» и мы ее приводим на рисунке 5.

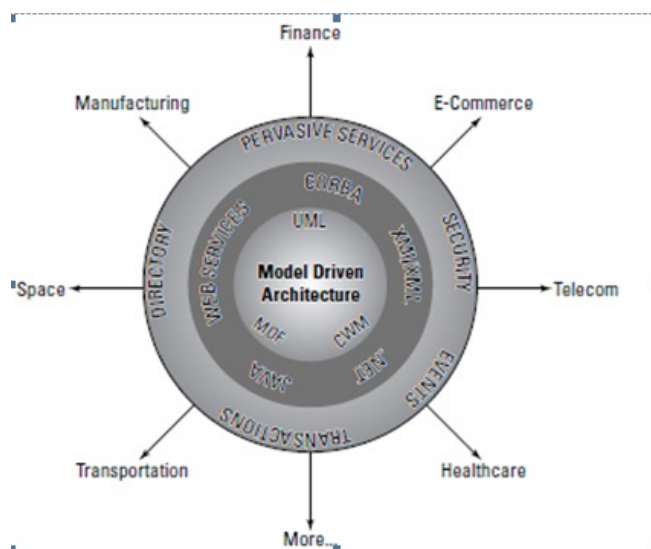


Рис.5. Архитектура управляемая моделями для построения многодоменных онтологий [24].

III. АНАЛИЗ РИСКОВ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

Онтология является одним из важных факторов реализации проекта анализа рисков больших данных (BDRA) для железных дорог [24]. Целью BDRA является поддержка анализа рисков и принятие решений по безопасности из широкого спектра источников данных, а также для улучшения управления рисками безопасности на железных дорогах. Онтология – это систематическая классификация предметных знаний, которая поддерживает использование различных баз данных осмысленным образом. В этом случае домен - это безопасность и риски для железных дорог Великобритании, а концепции - это способы объединения компонентов в домене и взаимодействовать, чтобы создать эмерджентное поведение всей системы. Этот отчет [24] содержит поиск литературы для анализа фона онтологий, онтологий в компьютерных науках и онтологий которые применяются к железнодорожной области. Это позволяет обоснованное решение о правильном инструменте для использования в программе BDRA и создает базу знаний для правильного использования онтологий [24]. Так как [24] одна из самых интересных работ по выбранной нами теме, и Великобритания несомненный лидер в построении цифровых железных дорог в мире [1], хотя бы потому, что не только их практически создает, но и уже выпускает новые поколения железнодорожных стандартов на эту тему [1], то мы решили привести для читателя подобранные в [24] иллюстрации.

Так, на рисунке 6 показаны основные возможности для BDRA, которые дает онтология. Так именно онтология позволяет реализовывать JIT или работу в реальном времени с аналитикой по собранным данным то это упрощает визуализацию по принципам JIT.

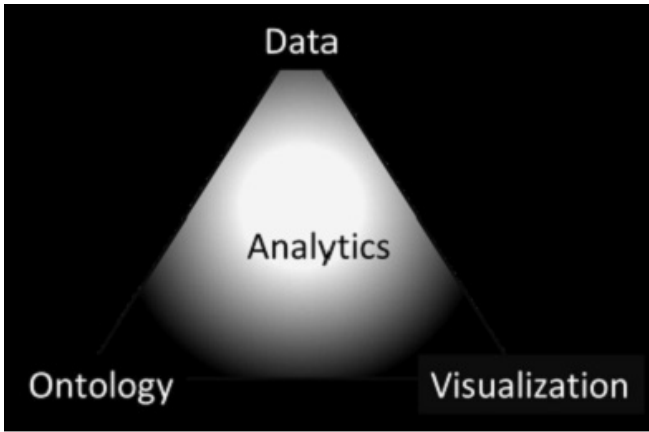


Рис. 6. Основные возможности для BDRA [24]

На рисунке 7, взятом из [24,] семантические слои естественного языка, которые можно обработать с помощью онтологий и семантики. Это огромное преимущество для включения в ИТ документов на естественном языке, без которых работа цифровой (и любой) железной дороги не мыслима.

Онтология в компьютерных системах для цифровой железной дороги могут развиваться в совокупности с прогрессом в технологиях AI и ключевой для увеличения возможностей AI технологии ML, которая быстро развивается в последнее время именно в железнодорожном секторе. С точки зрения онтологии это возможность появляется, когда становятся реальными компьютерные рассуждения. Прогресс развития онтологических компьютерных технологий показан на рисунке 8.

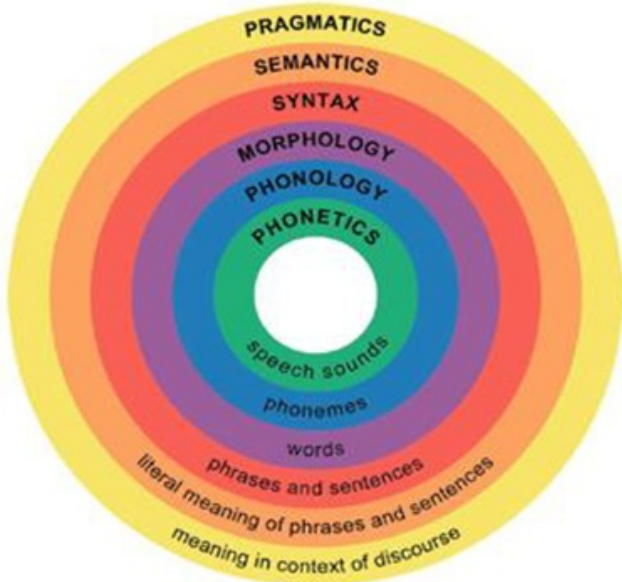


Рис.7. Семантические слои естественного языка [24]

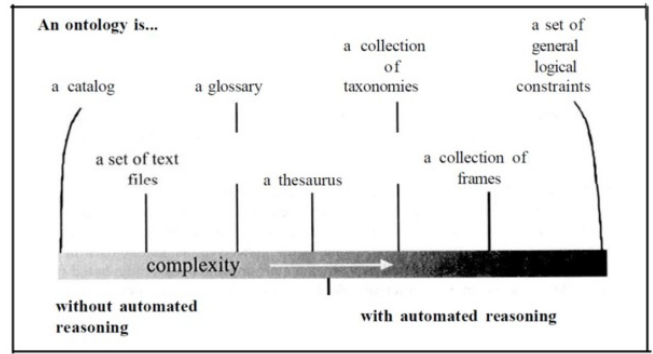


Рис. 8. Онтология в компьютерных системах [24]

На рисунке 9 мы приводим классический вид построенной железнодорожной онтологии верхнего уровня. В таком общем виде, она требует оптимизации, как по размерам, так и по доменам, чтобы получить все преимущества использования, например, рассуждений на практике.

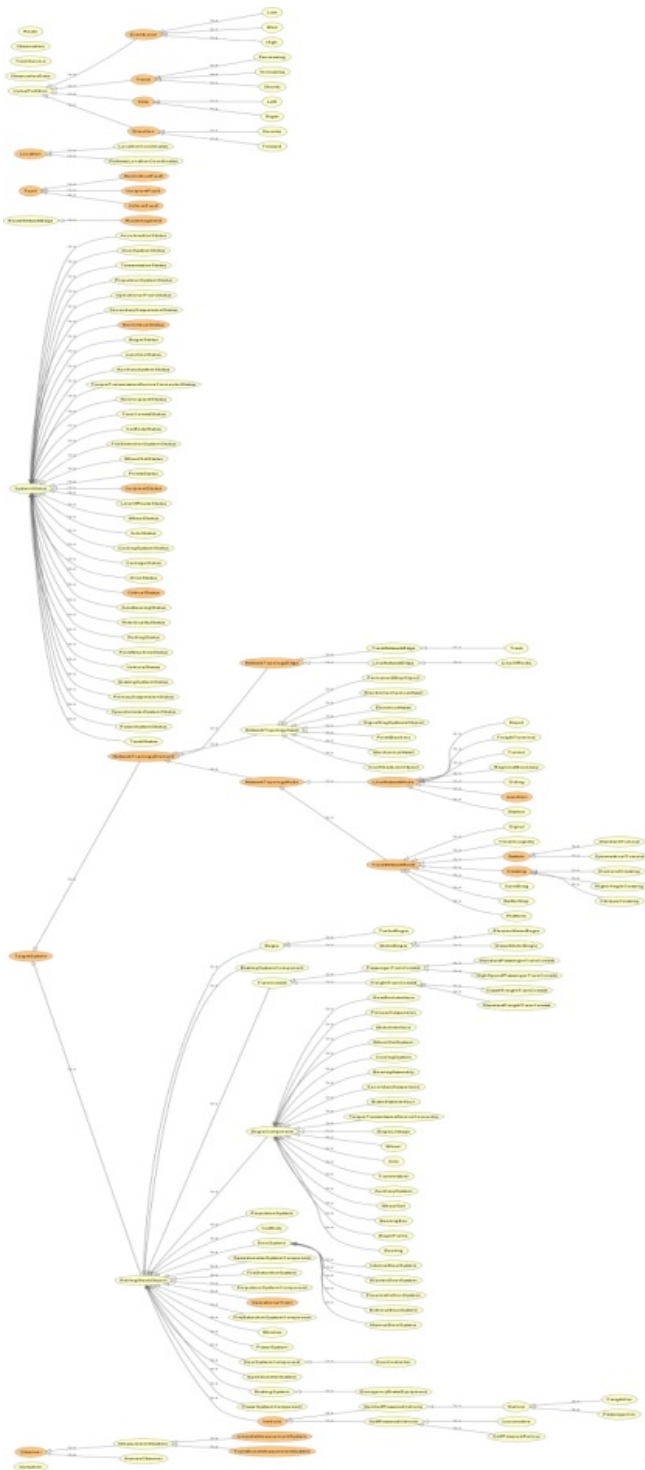


Рис. 9. Онтология железнодорожного домена. (От Льюиса (2012) приводим по источнику[24])

IV. ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ ДОМЕНОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ОНТОЛОГИИ – BIM и IDUSTRY 4.0

Для того чтобы показать практические возможности применения онтологических принципов и средств мы выбрали в дополнение к очень подробной работе [3] тему соединения создания цифровой железной дороги через открытый онтологический BIM (buildingSmart) и подвижного состава для цифровой железной дороги через онтологические инструмента IDUSTRY 4.0 (eCI@ss).

На уровне ЕС мы хотели бы показать то, как что делается и планируется к эксплуатации на примере железнодорожного проекта Rail Baltica. Rail Baltica - это новая «быстрая традиционная» смешанная железнодорожная линия, соединяющая Каунас в Литве, Ригу в Латвии и Таллинн в Эстонии, и расширение пути из Вильнюса до Каунаса. С общей длиной линии электрифицированного двойного пути ERTMS L2, и который планируется построить по европейским стандартам, применяя цифровые датчики, отвечающие европейским «Техническим спецификациям на совместимость», с максимальной расчетной скоростью 240 км/ч для пассажирских поездов и 120 км/ч для грузовых поездов [17]. Rail Baltica является поэтому классическим примером фрагмента цифровой железной дороги.

Rail Baltica – это проект, совместно финансируемый Европейским союзом и участвующими в нем железнодорожными органами странами, который будет иметь смешанные терминалы, расположенные в Мууге в Эстонии, Саласпилс в Латвии, 4 в Каунасе и Вильнюсе в Литве, плюс семь железных дорог и пассажирские станции, расположенные в Таллине, Пярну, Риге, в центре Риги, Паневежисе, Каунасе и Вильнюсе, а также линии между аэропортами Каунаса и Вильнюса [17]. Карта цифровой железной дороги проекта Rail Baltica ЕС и стран Балтии показана рисунке 10.



Рис. 10. Карта цифровой железной дороги проекта Rail Baltica ЕС и стран Балтии [17].

Предполагается, что Rail Baltica будет связана с Финскими железными дорогами через подводный туннель Таллин-Хельсинки и соответственно через Польшу Германию Данию Норвегию и Швецию с Финляндией, образуя в промышленно сильном севере Европы современное цифровое железнодорожное кольцо.

С точки зрения онтологии Rail Baltica добавляет большой пласт понятий в картину времени прибытия поезда на станцию. Это три языка, различия в технических нормах и правовом регулировании и необходимость соблюдать правовые требования ЕС [12]. Помимо этого растут скорости движения, увеличивается безопасность и падает стоимость проезда и все это так же меняет очень многое и не только в онтологии, но и например поведение рабочей силы [10].

Учитывая все сказанное необходимо рассчитывать экономику всего жизненного цикла, как инфраструктуры, так и подвижного состава. Подвижной состав для цифровой железной дороги для достижения

этих успехов требует практически 100% замены [30]. Однако для того чтобы использовать все эти преимущества необходимо научиться правильно собирать информацию, хранить в необходимом формате [2], и, в итоге, научить понимать ситуации и принимать с помощью ИИ правильные и быстрые решения. Так через машинное обучение (ML) ИИ становится полноправной новой технологией общего назначения и сам создает новые профессии и изменяет старые [6]. Изменения на железной дороге напрямую зависят от сложности области деятельности. Для того чтобы показать это еще раз, но уже в формализованной кооперативной форме (о кооперации [3]) и для сравнения с рисунком 7 после создания которого прошло уже несколько лет и создана уникальная онтологическая кооперация [3], мы приводим рисунок 11. Но для того, чтобы полностью согласовать и формализовать IFC RAIL, потребуется, по мнению buildingSmart, выпустить новую версию IFC (рисунок 12).

Example : domains (IFC RAIL)

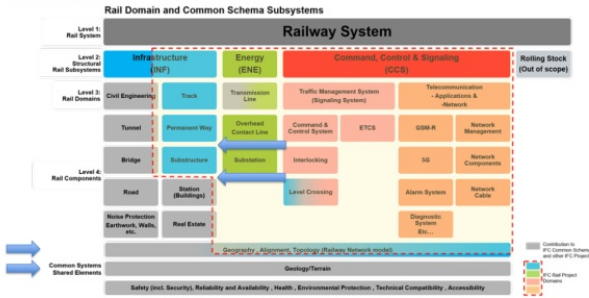


Рис. 11. Как выглядит онтологический домен IFC RAIL с точки зрения buildingSmart (источник – buildingSmart)

Fork and Merge in upcoming IFC developments

Parallel work

- IFC4 → building, products
- IFC4.1 → Alignment, Terrain
- IFC4.x → if needed e.g. IFC Bridge
- IFC5 → Infrastructure



Рис. 12. Для того чтобы отразить все онтологические аспекты IFC RAIL планируется выпустить новую (пятую) версию языка IFC (источник – buildingSmart)

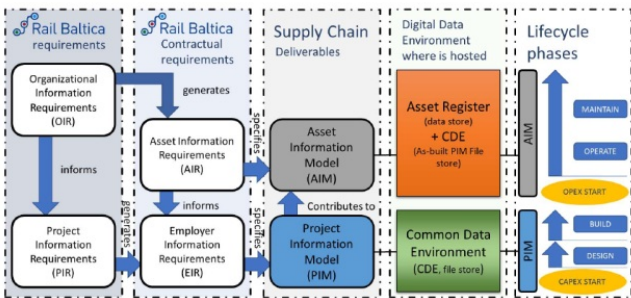


Рис. 13. Жизненный цикл - PIM и AIM [17].

Управление существующим железными дорогами осуществляется с использованием информации, собранной ретроспективно. Стратегии открытого (онтологического) BIM, представленные в [17-20],

представляют собой возможность сбора данных, поскольку они созданы во время проектирования и строительства, что дает возможность не только сэкономить затраты на повторное обследование после строительства, но и на обеспечение качества информации, которое, до сих пор, не проводилось в системах управления активами.

Поэтому предлагается, чтобы информация об активах будет систематически собирать в общих форматах, (среди которых в указанных выше документах приоритетным объявлен формат IFC), которая может быть, в конечном итоге, передана или указана в нескольких системах управления активами. Поразительным результатом [17 - 20], которые являются не теоретическими трудами, а фактическими управленческими документами огромной стройки позволяет применить онтологию для практической выгоды в жизненном цикле цифровой железной дороги (рисунок 13), который будет составлять как минимум 50 лет. Фактически в проекте Rail Baltica вводится понятие цифрового управления [25] и владельца цифровых активов [26].

Вместе с тем развитие онтологий buildingSmart продолжается в очень важных направлениях помимо IFC Rail [21-23] и стоит ожидать новых удивительных результатов.

Так как онтологические аспекты на строительстве железных дорог сосредоточены сегодня на развитии большого проекта IFC Rail и развитие этого направления изложено в работах [3-6], значение которого настоль велико, что приводит в новой версии IFC (рисунок 12), то мы сосредоточимся на дополнении изложенного исходя из простого соображения: чем лучше согласованы свойства поездов и инфраструктуры, тем более лучших результатов можно добиться в процессе эксплуатации.

Восходящая онтологическая звезда eCI @ ss является также как buildingSmart некоммерческим обществом для создания открытых стандартов, которые поддерживает цифровой обмен описаниями продуктов и описаниями услуг на основе стандартизированных форматов данных на основе мирового стандарта МЭК 61360. Его стандарты используется в технических средствах в качестве базы для передачи данных планирования, [28] в системах ERP в качестве базы для основных данных продукта, и как база для обмена данными о продукции. В eCI @ ss состоит вся промышленная элита INDUSTRY 4.0 не только Германии, но всего мира. Именно по стандартам eCI @ ss на промышленных предприятиях мира и будет создаваться подвижной состав для цифровой железной дороги.

Система классификации eCI @ ss, подобно IFC, основана на иерархической группировке продуктов и услуг. Существует 4 уровня иерархии (рисунок 14):

- Сегменты,
- Основная группа,
- Группа,
- Подгруппа или класс продукта.

Эта классификация обеспечивает группировку с точки зрения покупки, например, для комплектации производства деталями. Класс продукта имеет отношение 1:1 к классу приложения. Классы применения описаны более подробно со свойствами в соответствии с IEC 61360. Этот подход отделяет определение иерархии классификации от определения описания продукта.



Рис. 14. 4 уровня иерархии в eCI @ ss (источник - eCI @ ss)

Приведем то, что говорит Маркус Рейгл Председатель eCI @ ss в удивительной работе [11]:

«Самое динамичное поле в этом мире известно как умное производство или промышленность 4.0. В этом быстро растущем секторе ясно, что нет возможности описания свойств того что может быть создано, и, таким образом, также нет возможности появления «цифрового близнеца», без гарантии качества семантического репозитория... Там не может быть никакого умного производства и его административной оболочки без связанной семантической системы и без универсальных интеллектуальных производственных компонент без связанной с ними онтологии».

В конце 2018 года eCI @ ss и buildingSmart подписали соглашение о сотрудничестве [29], которое будет, во многом, определять онтологические рамки подвижного состава цифровой железной дороги [30] и ее строительство.

V. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОАКТИВНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ АКТИВОВ

В жизненном цикле любых железных дорог самые большие затраты возникают на этапе эксплуатации и именно на этом этапе происходит возврат сделанных ранее инвестиций и получение прибыли. Проверка и техническое обслуживание являются ключевыми способами обеспечения надежности железнодорожных активов на протяжении всего их жизненного цикла, о котором шла речь выше. Оборудование, которое выходит из строя в процессе эксплуатации, влечет за собой затраты, превышающие запланированную замену, в виде риска для безопасности, перебоев в работе сети, задержек и отмены обслуживания.

Реактивное, проактивное или корректирующее обслуживание - исправление оборудования после возникновения неисправности - должно быть сведено к

минимуму, и более активные формы обслуживания, предотвращающие отказ, должны быть нормой.

Однако это сложная задача. Профилактическое или плановое техническое обслуживание, основанное на общей статистике надежности и ожидаемой продолжительности жизни, доступной для класса активов, не гарантирует, что проведенные проверки выявят конкретную часть оборудования, которая в дальнейшем выйдет из строя. Тут нужны более точные знания, связанные с онтологическими моделями.

Напротив, прогнозное обслуживание, которое использует мониторинг состояния активов в режиме реального времени (JIT), сбор данных об оборудовании во время операций для выявления проблем и прогнозирования момента, когда оборудование выйдет из строя, является перспективной областью экономии для железнодорожной отрасли. Признано, что не все типы активов требуют такого подхода, но способность определить правильный момент, когда часть оборудования должна быть отремонтирована или заменена, помогает избежать инцидентов и простоев, в то же время, поддерживая частоту обслуживания как можно ниже [31] и рисунок 15.

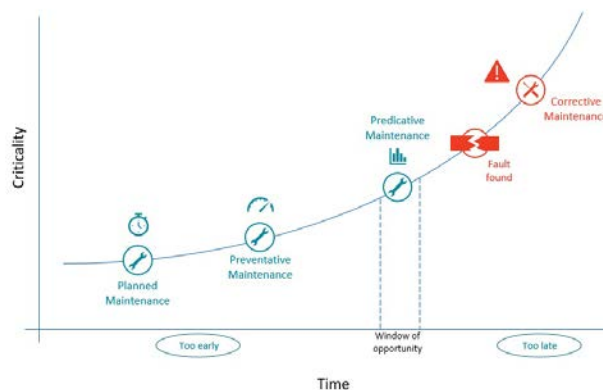


Рис. 15. Окошко возможностей для оптимального проведения обслуживания активов железной дороги [31]

Упреждающее техническое обслуживание было бы невозможно без множества датчиков, используемых в промышленности для сбора в реальном времени информации о состоянии и состоянии оборудования (анализ вибрации, дистанционный визуальный мониторинг, инфракрасный и акустический анализ, мониторинг температуры и давления). Интеллектуальное обслуживание также было бы невозможно без средств понимания всех этих данных и превращения их в прогнозирующее понимание: вот куда может прийти машинное обучение и ИИ, базирующиеся на онтологических знаниях.

Прогнозирующее программное обеспечение машинного обучения может выяснить, какая комбинация факторов приводит к определенным типам сбоев, находя сложные базовые взаимосвязи, поэтому, когда эти факторы идентифицируются снова, сбой может быть предсказан. В сочетании с методами интеллектуального анализа данных могут быть разработаны модели и инструменты, которые могут оценивать работоспособность активов и прогнозировать оставшийся полезный ресурс.

Компьютерное зрение, или машинное зрение, включает использование цифровых систем визуализации для автоматического извлечения, анализа и понимания информации из изображений и других форм многомерных данных. Эти методы набирают популярность в тех областях, где используются повторяющиеся визуальные проверки, например, распознавание лиц в приложениях служб безопасности аэропорта и социальных сетей. Применение технологий машинного зрения к железнодорожному контролю дает промышленности возможность получить огромные преимущества. Человеческие инспекторы обычно используются для проведения визуальных и / или взвешенных проверок важных активов. Этот подход требует много времени, затрат и, учитывая его зависимость от людей, может быть непоследовательным и подверженным ошибкам. Использование технологии машинного зрения, способных фиксировать подробные записи состояния активов, дает возможность повысить безопасность, как персонала, так и пассажиров, одновременно снижая общие расходы. Методы визуализации, такие как линейное сканирование и сканирование областей, тепловизорами и идентификация цвета, могут использоваться вместе для выявления неисправностей, ведущих к повышению безопасности, надежности и обслуживания.

Есть несколько железнодорожных компаний, которые начинают использовать эти методы, чтобы революционизировать работу, выполняемую в этих областях. В 2012 году Network Rail (Великобритания) представила систему распознавания образов в виде простой линии (PLPR) вместо визуального контроля пути. Система использует сеть линейного сканирования, 3D и тепловизионные камеры для захвата изображений головки рельса. Программное обеспечение машинного зрения может идентифицировать дефекты, которые затем проверяются инспектором [31].

Система распознавания образов используется наряду с системами измерения и позиционирования геометрии пути для перекрестной проверки состояния компонентов пути и их потенциального влияния на опору рельса и относительное положение. Эта система повысила безопасность рабочих на путях, повысила доступность путей и улучшила качество и эффективность проверок на путях.

В работе [32] по проектированию проактивных железнодорожных инфраструктур было запланировано проведение комплексного пилотного проекта. Цель этого пилотного проекта - повысить надежность высокоскоростных железнодорожных сетей за счет оптимизации работы оператора и поддержания инфраструктуры железнодорожного транспорта. Пилот будет состоять в применении технологий Big Data для обработки неоднородных данных, собранных для понимания переменных, которые влияют на производительность операторов, и моделируют характер инцидентов, связанных с обслуживанием, которые происходят в инфраструктуре (пути, туннели, мосты и т. д.) на основе железнодорожного движения, потоков подвижного состава, данных по техническому обслуживанию, планированию и контролю.

Этот анализ также будет включать в себя внешние переменные, такие как прогнозы погоды или конкретные события (летние каникулы) для прогнозирования деятельности по обслуживанию железнодорожной сети и, следовательно, для улучшения работы по поддержанию всей железнодорожной инфраструктуры. Более того, это решение может также позволить операторам железнодорожного транспорта прогнозировать в реальном времени влияние определенных событий на управление трафиком. Требования и планирование результатов пилота показаны на рисунке 16.

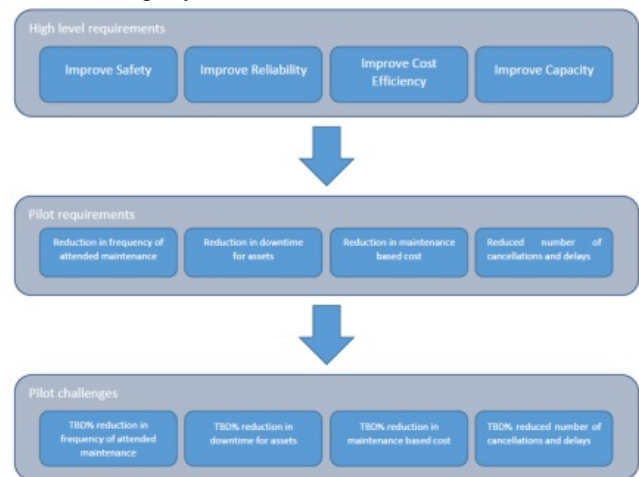


Рис. 16. Требования и планирование результатов пилота [32]

Для решения этих задач пилот должен ответить на следующие вопросы:

- Когда произойдет сбой актива?
- Какие тенденции можно определить на основе исторических источников данных?
- Какая точность данных необходима для получения вероятного прогноза?
- Какие существуют отношения между:
 - o Наборами данных?
 - o Сбоями активов?
- Учитывая неудачу, может ли быть предсказан еще один каскадный провал вскоре после этого?
- Какова стоимость, понесенная / сохраненная путем прогнозирования (и последующего предотвращения) сбоев?

Применение новых технологий и процессов Big Data для облегчения внедрения ступенчатого изменения в обслуживании европейских железнодорожных инфраструктур служит для того, чтобы:

- Проверять качество, точность и происхождение данных активов, что
- Обеспечить своевременную фокусировку приоритетных операций по техническому обслуживанию (прогнозирование и предотвращение), что приведет к

- ✓ Повышенной надежности и доступности активов на стороне пути.
- ✓ Более высокая доступность железнодорожной инфраструктуры для пассажирских и грузовых перевозок; а также

- ✓ Повышение безопасности работников за счет минимизации деятельности на стороне пути

Рис. 17. Как работает TT Secure Storage платформы Thales Analytics – расчет выгод [32]

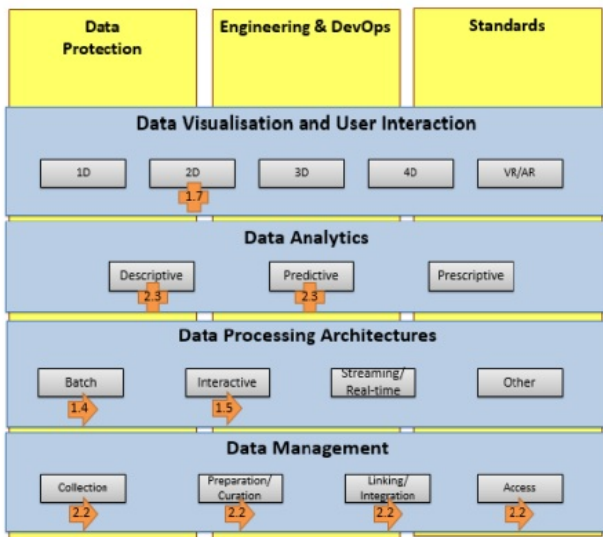


Рис. 18. Эталонная модель повышения эффективности за счет больших данных [32].

Основные результаты этого документа состоят в выявлении проблем и улучшении возможностей, связанных с обслуживанием железных дорог на базе расчет выгод с помощью TT Secure Storage платформы Thales Analytics (рисунок 17) и создания более широкой эталонной модель повышения эффективности за счет больших данных (рисунок 18).

В итоге, эти возможности перечислены [32] следующим образом:

- Стратегические возможности:
 - Техническое обслуживание
 - Контракт на техническое обслуживание
 - Определение и локализация ресурсов обслуживания
 - Определение срока службы и обслуживания
 - Проектирование сети с учетом обслуживания
 - Планирование обновления и планирование проекта
- Операционные возможности:
 - Планирование владения
 - Техническое обслуживание и маршрутизация команды
 - Перепланирование
 - Планирование технического обслуживания на основе износа
 - Техническое обслуживание маршрутизации и планирования команды
 - Планирование технического обслуживания
 - Сроки работы и планирование ресурсов
 - Планирование использования путей.

Несмотря на то, что ранее комментируемые возможности более конкретны и оперативно сфокусированы, можно определить, что они полностью согласуются с целями, которые предполагает прогнозирующая стратегия. Это представляет собой актуальную проблему для обеспечения возможности тиражирования результатов пилотного проекта не только в национальном контексте, но и в европейских рамках, в том числе и в России.

Существует очевидная причина для распространения этой технологии на другие объекты инфраструктуры. Приложения лучше всего подходят для активов, где есть более однородные и видимые компоненты с определенными геометрическими отношениями, такие как, например, системы воздушных линий.

Прогнозное обслуживание подвижного состава так же активно развивается. Производители поездов, такие как Hitachi и CRRC, стремятся к цифровой революции в обслуживании поездов. Новые поезда IEP компании Hitachi оснащены датчиками, которые в реальном времени собирают данные из более чем 48 000 сигналов для подачи в систему, которая отслеживает состояние и предоставляет информацию соответствующим техническим командам для поддержки принятия решений. CRRC разработала систему прогнозирования и управления техническим состоянием (PHM), основанную на машинном обучении, которая была применена к сети высокоскоростных железных дорог в Китае [31]. Эта система может упростить принятие решений об эксплуатации и техническом обслуживании, объединяя данные о физических характеристиках, диагностику неисправностей, оценки состояния здоровья из различных источников.

Система CRRC имеет новый способ решения проблемы шума в данных без использования огромных вычислительных мощностей, повышения точности и эффективности. Определяя функцию плотности вероятности (PDF), способ вычисления относительной вероятности падения переменной между конкретным диапазоном, можно определить, является ли считывание характеристической ошибкой или нет. Значения PDF сравниваются с эталонными значениями и расстоянием Хеллингера, то есть сходством двух рассчитанных вероятностных распределений. Затем расстояние Хеллингера вводится в вычисление байесовского вывода, которое изменяется с каждым новым полученным фрагментом данных, чтобы создать единый рисунок, показывающий вероятность неисправности компонента.

С момента внедрения этой системы затраты на техническое обслуживание оборудования снизились более чем на 25%, а частота отказов снизилась примерно на 75% [31]. Поскольку эти флоты поездов тратят больше времени на обслуживание, методы машинного обучения могут применяться к собранным историческим данным, чтобы идентифицировать новые комбинации сигнатур и тенденций, которые предшествуют неудаче.

Адаптируемый искусственный интеллект, способный к обучению и обладающий высокой устойчивостью, чтобы справляться с инцидентами, авариями, кибератаками и переходом с помощью вмешательства

человека, может предложить долгосрочные конкурентные преимущества [34].

Абсолютные продажи железнодорожных поставщиков в ЕС в 2014 году составили 47 млрд. евро. ЕС представляет собой самый большой абсолютный рынок железнодорожных продуктов и услуг, причем сегмент подвижного состава представляет наибольшую часть этого рынка [34]. Соответственно, и улучшения обслуживания подвижного состава поэтому вносят существенную долю улучшений в расходы железнодорожных компаний.

VI. РАСТУЩАЯ РОЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Несмотря на то, что некоторые методы используются в железнодорожном транспорте, по-прежнему существуют огромные возможности для преобразования способов выполнения многих аспектов инспекции и технического обслуживания, которые во многих случаях являются ручными, повторяющимися и основаны на традиционных методах, основанных на временном интервале.

Радикальные инновации стали возможными благодаря использованию машинного обучения в мире робототехники, которое улучшило их способность ориентироваться, адаптироваться к окружающей среде, манипулировать объектами и управлять движением. Мощная комбинация машинного обучения с робототехникой, базирующаяся на онтологизированных знаниях, позволяет создавать системы «находи и исправляй», которые требуют ограниченного взаимодействия с человеком. Примеры этого можно найти в морской и автомобильной промышленности, и они начинают появляться в железнодорожной промышленности.

Мотивация использовать методы машинного обучения для автоматизированного контроля и прогнозного обслуживания должна быть сильной в железнодорожной отрасли, где есть активы с длительным сроком службы, которые компании стараются обслуживать как можно дольше. Улучшение технического обслуживания и инспекций может снизить эксплуатационные расходы и продлить срок эксплуатации активов.

Чтобы в полной мере использовать эти новые технологии, железнодорожная отрасль должна пересмотреть свой подход к сбору и хранению данных и выбрать правильный набор онтологий. Широкий охват и высокое разрешение необходимы для выявления тенденций ошибок и сигнатур. Еще одной ключевой проблемой, связанной с техническим обслуживанием железных дорог, является эксплуатация и управление сложными, переплетенными графиками и планами, в которых задействованы люди, активы и безопасный доступ. Это обширная онтологическая предметная область, в которой используются приложения машинного обучения, и она может разрешать конфликты, повышать уровень использования и, в конечном итоге, предоставлять лучший сервис для клиентов. Начальное отображение приложений машинного обучения на железной дороге приведено на рисунке 19. Легко видим насколько оно уже широкое.

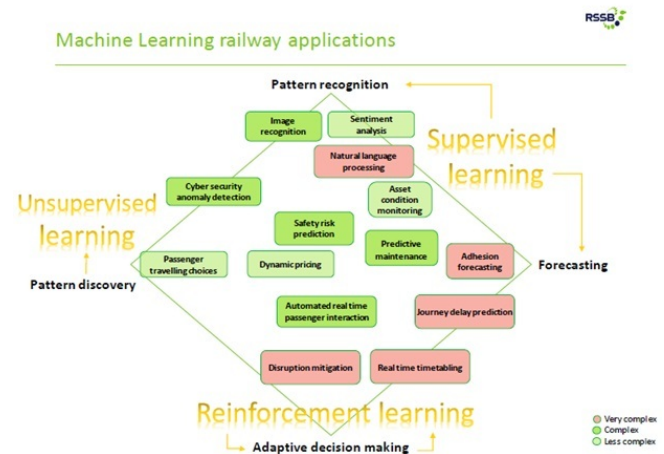


Рис. 19. Приложения машинного обучения на железной дороге - начальное отображение [33]

Сбор информации для ML и AI должен справиться с неправильным написанием, разным качеством грамматики и использованием жаргонных терминов, а также многих слов, которые имеют двойное значение или различные назначения, таких как пас, гвоздь или доска. По этой причине мы должны разработать соответствующую железнодорожную онтологию, чтобы цифровая система «понимала» однозначно конкретную проблему, например, безопасности, поднятую в любом отчете. Вот тут-то и возникает онтология: она описывает набор терминов, имеющих отношение к растительности, а также описывает, что это за отношения [14].

Таким образом, не только человек вынужден начать заново учиться в цифровой экономике [13], но и компьютерам также нужно новое обучение. Только читают и понимают и учатся компьютеры делают это совсем не так как люди и для того что бы рассчитать решение им нужны как исторические данные о том как та или иная ситуация развивалась, и как человек принимал решения, так и данные от сенсоров интернета вещей, которые изначально цифровые.

Тогда машинное обучение может оптимизировать через ИИ операционные показатели за счет повышения уровня эффективности принятия решений и повышения общей эффективности. Для цифровых железных дорог это, похоже, возможность для дальнейшего изучения, также как и для глубоких изменений в культуре

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ИЛИ ОНТОЛОГИЯ КАК ПЕРЕЛОМНЫЙ МОМЕНТ НА ЦИФРОВОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Как и в исследовании ЕС [38], о том что будет включать будущий интернет, где онтология занимает очень почетное место, мы находим, что онтологии могут изменить правила игры для цифровой практики. Современные формы онтологий являются методом поддержки новых подходов к научному смыслу, который не является исключительно компьютерным. Проблема в современной экономике начинается с анализа данных. Анализ данных - это исследовательский процесс, используемый для того чтобы извлекать знания, информацию и понимание реальности, изучая

данные. Анализ данных включает в себя уточнение гипотезы, сбор данных, моделирование данных и интерпретация результатов. Современная аналитика данных обычно включают количественную статистику, даже если это узкое представление анализа данных.

Введение большого объема данных, доступных через оцифрованные системы, приводит к «потоку данных», когда наборы данных могут далеко превзойти способность систем понимать их. Вот где введение модели данных (и онтологии как части моделей) предлагают решения. В традиционном процессе осмысления (Рисунок 20) теоретические схемы сравниваются с наблюдаемой информацией. Если есть какие-либо расхождения (т.е. идеи) замечены, теория обновлена, или информация игнорируется. В поддержке смысла данных аналитики выводят модель из теоретической схемы, которую они сравнивают с данными. Аналитики различают расхождения между теорией и данными от различий, возникающих в результате дисперсии и предвзятости, и используют модели, чтобы проверить их гипотезу. После обновления модели и проверки результатов их гипотеза, научная схема может быть обновлены с большей уверенностью. Авторы этой работы считают, что онтологии, по крайней мере, частично, помогают этому новому способу построения моделей и последующим разработкам схем цифровой железной дороги.

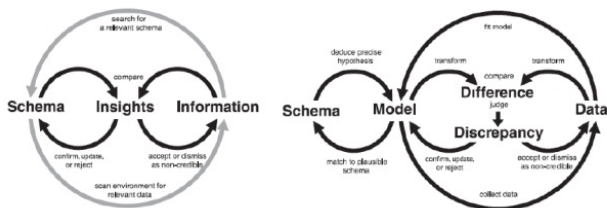


Рис. 20. (а) Традиционная модель осмысления, (б) осмысление, поддерживаемое моделированием аналитики данных: модель знаний включена, где онтологии играют роль. (Источник: Grolemond & Wickam (2014) приводим по источнику -[24]).

Учитывая быстрое мировое развитие городских железных дорог и ВСМ [37] как цифровых (это справедливо и для России), нам представляется изложенное важным для дальнейшего обсуждения. В проектах ЕС онтологии железных дорог уже выделены в отдельный проект [36].

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Покусаев О. Н. и др. Онтологии системы систем в национальных стандартах цифровой железной дороги Великобритании //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 11.
- [2] Гринько О. В. и др. Онтологизация данных Европейского союза как переход от экономики данных к экономике знаний //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 11.
- [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] Куприяновский В. П. и др. К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТАХ ПРИМЕНЕНИЯ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ ОНТОЛОГИЙ В ЭКОНОМИКЕ ДАННЫХ - ОПЫТ ЕС //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 8.
- [5] Куприяновский В. П. и др. Формализованные онтологии и сервисы для высокоскоростных магистралей и цифровой железной дороги //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 6.
- [6] Sokolov I. et al. Robots, autonomous robotic systems, artificial intelligence and the transformation of the market of transport and logistics services in the digitalization of the economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6. – №. 4. – С. 92-108.
- [7] Sokolov I. et al. On artificial intelligence as a strategic tool for the economic development of the country and the improvement of its public administration. Part 1. The experience of the United Kingdom and the United States //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 9. – С. 57-75.
- [8] Sokolov I. et al. On artificial intelligence as a strategic tool for the economic development of the country and the improvement of its public administration. Part 2. On prospects for using artificial intelligence in Russia for public administration //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – №. 9. – С. 76-101.
- [9] D. Li, W. Daamen, and R. M. P. Goverde, “Estimation of train dwell time at short stops based on track occupation event data: A study at a Dutch railway station,” J. Adv. Transp., vol. 50, no. 5, pp. 877–896, Aug. 2016
- [10] The Effect of Infrastructure on Worker Mobility: Evidence from High-Speed Rail Expansion in Germany, Daniel F. Heuermann and Johannes F. Schmieder, NBER Working Paper No. 24507 April 2018 JEL No. J61, R12, R23, R40
- [11] TOWARD SMART MANUFACTURING WITH DATA AND SEMANTICS. An eCI@ss white paper 2018
- [12] Report on Railway Safety and Interoperability in the EU 2018 (June 2018) © European Union Agency for Railways, 2018
- [13] THE CHANGING NATURE OF WORK © 2019 International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank
- [14] Machine Learning <https://www.rssb.co.uk/Pages/machine-learning-challenges-and-opportunities-of-incorporating-machine-learning-into-rail-safety-analysis.aspx>
- [15] LEMO D 1.1 Understanding and Mapping Big Data in Transport Sector, LEMO April 2018
- [16] Machine Learning For Dummies®, IBM Limited Edition Published by John Wiley & Sons, Inc. 111 River St. Hoboken, NJ 07030-5774, 2018 by John Wiley & Sons, Inc
- [17] Detailed BIM Strategy, BIM Manual, Detailed BIM Strategy Guidelines, Public draft v0.1 RB Rail AS, Reg. No 40103845027 K. Valdemāra iela 8-7 Riga, LV-1010, Latvia PUBLIC 21/08/2018

- [18] Detailed BIM Strategy. Update from the BIM Strategy Framework, RB Rail AS Reg. No 40103845027 K. Valdemāra iela 8-7, Riga, LV-1010, Latvia PUBLIC.27/07/2018
- [19] Detailed BIM Strategy. Post-contract BIM Execution Plan (BEP) Template. Detailed BIM Strategy Guidelines Public draft v0.1 RB Rail AS Reg. No 40103845027 K. Valdemāra iela 8-7 Riga, LV-1010, Latvia PUBLIC 21/08/2018
- [20] Detailed BIM Strategy. CAD Standard. Detailed BIM Strategy .Guidelines. Public draft v0.1RB Rail AS Reg. No 40103845027 K. Valdemāra iela 8-7 Riga, LV-1010, Latvia PUBLIC 21/08/2018
- [21] IFC Infra Overall Architecture Projects. Documentation and Guidelines. BSI 2017
- [22] Infrastructure Asset Managers BIM Requirements. Technical Report No. TR 1010. Author: Phil Jackson, on behalf of buildingSMART International Infrastructure Room. Version 1BSI published 2018 / 01 / 09
- [23] Regulatory Room Working Group, Report on Open Standards for Regulations, Requirements and Recommendations Content. BSI 2017 Airport Room Roadmap Report, JULY 2018, BSI 2018.
- [24] Background of Ontology for BDRA, University of Huddersfield Institute of Railway research, 2015
- [25] Government Functional Standard GovS 002: Project delivery Portfolio, programme and project management, Version: 1.2, Status: Approved for internal government trial, Date issued: 1 August 2018
- [26] Guidance on the IAO Role Version 1.3 – May 2018 © Crown copyright 2013
- [27] Jeffrey T. Pollock Semantic Web For Dummies, 2009 by Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana
- [28] White paper AutomationML and eCl@ss integration" (PDF). Automation ML e.V. Retrieved September 25, 2018.
- [29] E-Cl and Buildingsmart <https://b2b.partcommunity.com/community/blogs/135785/6777/cooperation-between-e-cl-ss-and-building-smart-will-support-bim>
- [30] Rolling Stock Perspective. Fourth edition Moving Britain Ahead, Crow 2018
- [31] Machine learning at automated inspection <https://www.rssb.co.uk/Pages/machine-Learning-at-the-core-of-automated-inspection-and-predictive-maintenance.aspx>
- [32] TT D6.1 Proactive rail infrastructures pilots design Transforming Transport (TT) 14/03/2017
- [33] Machine learning models <https://www.rssb.co.uk/Pages/Machine-Learning-techniques-algorithms-and-models.aspx>
- [34] SCORE D3.1 Mapping of future perspectives and challenges for the value chain of European transport manufacturing industry 2018
- [35] Machine learning: the power and promise of computers that learn by example, The Royal Society, 2017
- [36]GoF4R D4.2 Synthesis of the Semantic Interoperability Technology Market Analysis GoF4R 14/112018
- [37] Pulido, Daniel, Georges Darido, Ramon MunozRaskin, and Joanna Moody, editors. 2018. The Urban Rail Development Handbook. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1272-9.
- [38] HUB4NGI D1.1 NGI CLASSIFICATION AND ASSESSMENT METHODOLOGY, HUB4NGI 2017.

Ontologies of big data, machine learning, and artificial intelligence on the digital railroad

Varvara Lazutkina, Alexander Klimov, Vasily Kupriyanovsky, Dmitry Namiot, Oleg Pokusaev

Abstract – This article focuses on the use of ontologies in digital railway projects. An ontology is a systematic classification of subject knowledge that supports the use of various databases in a meaningful way. Rail transportation has become an area in which productivity is increasingly dependent on the ability to extract information from complex data sets, as well as make optimal decisions in real time. Therefore, effective information and data management are vital for a railway, which is a closely related ontological system of systems where changes in any part can have significant consequences elsewhere. For example, ontology is one of the important factors for implementing a big data risk analysis project (BDRA) for railways. BDRA's goal is to support risk analysis and safety decisions from a wide range of data sources, as well as to improve rail safety risk management. As an example, the work considers ontological design for the digital railway project Rail Baltica. The large role of artificial intelligence and machine learning-based systems is noted. The paper also shows that in order to fully utilize these new technologies, the railway industry must reconsider its approach to collecting and storing data and choosing the right set of ontologies.

Keywords – digital railway, ontology, artificial intelligence.

REFERENCES

- [1] Pokusaev O. N. i dr. Ontologii sistemy sistem v nacional'nyh standartah cifrovoj zheleznoj dorogi Velikobritanii //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 11.
- [2] Grin'ko O. V. i dr. Ontologizacija dannyh Evropejskogo sojuza kak perehod ot jekonomiki dannyh k jekonomike znaniy //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 11.
- [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. – C. 66-78.
- [5] Kupriyanovskij V. P. i dr. Formalizovannye ontologii i servisy dlja vysokoskorostnyh magistralej i cifrovoj zheleznoj dorogi //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 6.
- [6] Sokolov I. et al. Robots, autonomous robotic systems, artificial intelligence and the transformation of the market of transport and logistics services in the digitalization of the economy //International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6. – #. 4. – S. 92-108.
- [7] Sokolov I. et al. On artificial intelligence as a strategic tool for the economic development of the country and the improvement of its public administration. Part 1. The experience of the United Kingdom and the United States //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 9. – S. 57-75.
- [8] Sokolov I. et al. On artificial intelligence as a strategic tool for the economic development of the country and the improvement of its public administration. Part 2. On prospects for using artificial intelligence in Russia for public administration //International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5. – #. 9. – S. 76-101.
- [9] D. Li, W. Daamen, and R. M. P. Goverde, "Estimation of train dwell time at short stops based on track occupation event data: A study at a Dutch railway station," J. Adv. Transp., vol. 50, no. 5, pp. 877–896, Aug. 2016
- [10] The Effect of Infrastructure on Worker Mobility: Evidence from High-Speed Rail Expansion in Germany, Daniel F. Heuermann and Johannes F. Schmieder, NBER Working Paper No. 24507 April 2018 JEL No. J61, R12, R23, R40
- [11] TOWARD SMART MANUFACTURING WITH DATA AND SEMANTICS. An eCl@ss white paper 2018
- [12] Report on Railway Safety and Interoperability in the EU 2018 (June 2018) © European Union Agency for Railways, 2018
- [13] THE CHANGING NATURE OF WORK © 2019 International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank
- [14] Machine Learning <https://www.rssb.co.uk/Pages/machine-learning-challenges-and-opportunities-of-incorporating-machine-learning-into-rail-safety-analysis.aspx>
- [15] LEMO D 1.1 Understanding and Mapping Big Data in Transport Sector, LEMO April 2018
- [16] Machine Learning For Dummies®, IBM Limited Edition Published by John Wiley & Sons, Inc. 111 River St. Hoboken, NJ 07030-5774, 2018 by John Wiley & Sons, Inc
- [17] Detailed BIM Strategy, BIM Manual, Detailed BIM Strategy Guidelines, Public draft v0.1 RB Rail AS ,Reg. No 40103845027 K. Valdemāra iela 8-7 Riga, LV-1010, Latvia PUBLIC 21/08/2018
- [18] Detailed BIM Strategy. Update from the BIM Strategy Framework, RB Rail AS Reg. No 40103845027 K. Valdemāra iela 8-7, Riga, LV-1010, Latvia PUBLIC.27/07/2018

- [19] Detailed BIM Strategy. Post-contract BIM Execution Plan (BEP) Template. Detailed BIM Strategy Guidelines Public draft v0.1 RB Rail AS Reg. No 40103845027 K. Valdemāra iela 8-7 Riga, LV-1010, Latvia PUBLIC 21/08/2018
- [20] Detailed BIM Strategy. CAD Standard. Detailed BIM Strategy .Guidelines. Public draft v0.1RB Rail AS Reg. No 40103845027 K. Valdemāra iela 8-7 Riga, LV-1010, Latvia PUBLIC 21/08/2018
- [21] IFC Infra Overall Architecture Projects. Documentation and Guidelines .BSI 2017
- [22] Infrastructure Asset Managers BIM Requirements. Technical Report No. TR 1010. Author: Phil Jackson, on behalf of buildingSMART International Infrastructure Room. Version 1:.BSI published 2018 / 01 / 09
- [23] Regulatory Room Working Group, Report on Open Standards for Regulations, Requirements and Recommendations Content. BSI 2017 Airport Room Roadmap Report, JULY 2018, BSI 2018.
- [24] Background of Ontology for BDRA, University of Huddersfield Institute of Railway research, 2015
- [25] Government Functional Standard GovS 002: Project delivery Portfolio, programme and project management, Version: 1.2, Status: Approved for internal government trial, Date issued: 1 August 2018
- [26] Guidance on the IAO Role Version 1.3 – May 2018 © Crown copyright 2013
- [27] Jeffrey T. Pollock Semantic Web For Dummies, 2009 by Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana
- [28] White paper AutomationML and eCI@ss integration" (PDF). Automation ML e.V. Retrieved September 25, 2018.
- [29] E-CI and Buildingsmart <https://b2b.partcommunity.com/community/blogs/135785/6777/cooperation-between-e-cl-ss-and-building-smart-will-support-bim>
- [30] Rolling Stock Perspective. Fourth edition Moving Britain Ahead, Crow 2018
- [31] Machine learning at automated inspection <https://www.rssb.co.uk/Pages/machine-Learning-at-the-core-of-automated-inspection-and-predictive-maintenance.aspx>
- [32] TT D6.1 Proactive rail infrastructures pilots design Transforming Transport (TT) 14/03/2017
- [33] Machine learning models <https://www.rssb.co.uk/Pages/Machine-Learning-techniques-algorithms-and-models.aspx>
- [34] SCORE D3.1 Mapping of future perspectives and challenges for the value chain of European transport manufacturing industry 2018
- [35] Machine learning: the power and promise of computers that learn by example, The Royal Society, 2017
- [36] GoF4R D4.2 Synthesis of the Semantic Interoperability Technology Market Analysis GoF4R 14/11/2018
- [37] Pulido, Daniel, Georges Darido, Ramon MunozRaskin, and Joanna Moody, editors. 2018. The Urban Rail Development Handbook. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1272-9.
- [38] HUB4NGI D1.1 NGI CLASSIFICATION AND ASSESSMENT METHODOLOGY, HUB4NGI 2017.