

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КАК ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Потапов В.П., Шокин Ю.И., Юрченко А.В.

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

DOI: 10.25743/ICT.2019.18.40.001

В работе рассматривается новый подход к созданию цифровых платформ для систем горнопромышленного мониторинга, основанный на применении технологии цифровых двойников. Указывается на тот факт, что современные мониторинговые системы используют все более разнообразные типы пространственных данных, для которых необходимо менять саму методологию сбора, обработки, хранения и анализа информации, которая распределена по различным источникам, что особенно характерно для крупных природно-технических, например, горнопромышленных комплексов. Такие системы имеют значительную протяженность, а производственные процессы воздействия на горный массив отличаются сложностью и разнообразием. В связи с резким возрастанием информационных потоков, требующих новых технологий их цифровой обработки, наиболее общим подходом следует признать применение концепции больших данных, связанных с ними методов анализа на основе искусственного интеллекта и математического моделирования. Для их применения требуется достаточно общая методология, которая позволила бы на единой платформе вести разработку систем горнопромышленного мониторинга, учитывая специфику всех его компонент. Предлагаемая в работе концепция на основе технологии цифровых двойников позволит решать поставленные задачи. Приводятся примеры реализации предложенной технологии применительно к системе экологического мониторинга предприятий горнопромышленного комплекса.

Введение. Горнопромышленные комплексы – крупномасштабные сложные системы со множеством внутренних связей, существенно влияющие на окружающую среду. Их мониторинг, оценка и прогноз возможного воздействия на внешнюю среду – ключевые шаги к предотвращению масштабных экологических катастроф, как явных, так и скрытых.

Системы мониторинга нового поколения все больше опираются на множественные источники информации, получаемая информация становится все более разнообразной, потоки и объемы ее растут прогрессивно. Эта тенденция в полной мере реализуется и в отношении мониторинга горнопромышленных комплексов, который будем называть, также, горнопромышленным мониторингом. Так как горнопромышленные комплексы являются масштабными, географически распределенными, то и информация, необходимая для оценки их состояния, является пространственной и при этом разнородной, многомодальной. С учетом существенно выросшего числа измеряемых и контролируемых параметров, повышения разрешающей способности измерительной аппаратуры можно утверждать, что эта информация приобретает характер больших данных.

Традиционные системы и подходы к горнопромышленному мониторингу и принятию решений на основе достаточно жестких, узких и во многом устаревших регламентов не подходят для анализа таких объемов количественно и качественно изменившихся пространственных данных. А неиспользование этих новых источников существенно снижает эффективность управления горнопромышленными предприятиями как в плане их экономики, так и в плане безопасности, в том числе, экологической. Особенно ярко это проявляется в связи с

интенсификацией использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса (мульти- и гиперспектральные, радарные и лидарные данные), открывших широкие возможности для наблюдения за динамикой крупномасштабных антропогенных систем горного производства и соответствующих техногенных процессов.

Новый взгляд на проблему управления горнопромышленным комплексом позволяет получить концепция цифровых двойников, в рамках которой методы анализа данных расширяются компьютерным моделированием, позволяющим, с одной стороны, восстанавливать недостающую информацию, получаемую с сенсоров системы мониторинга, с другой стороны, строить уточненные прогнозы развития процессов, в том числе, проводить многовариантный анализ последствий принятия тех или иных управленческих решений.

Поэтому сегодня необходимо пересмотреть общую методологию получения и использования данных от систем, используемых для мониторинга процессов горного производства, а также их интеграцию с процессами управления для обеспечения устойчивой обратной связи, особенно в отношении процессов, связанных с техногенным воздействием на окружающую среду. Для решения этой задачи предлагается подход к созданию промышленных систем мониторинга горного производства, предполагающий разработку специализированной цифровой платформы на основе технологии цифровых двойников.

Основы технологии цифровых двойников и их типы. Начиная с 2002-2003 года, когда Майкл Гривс впервые, как принято считать, определил понятие цифрового двойника в рамках учебного курса по жизненному циклу продуктов [1, 2], основными областями развития и применения цифровых двойников были технические и производственные системы. Последние несколько лет этой технологии уделяется пристальное внимание, подходы, связанные с созданием цифровых двойников, активно развиваются и внедряются [1, 3, 4 и др.] Сегодня описано и используется уже несколько концепций (стратегий) их создания. Важным шагом в развитии понятия цифрового двойника стало осознание того, что этот концепт применим не только к технологическим антропогенным системам, но и к живым системам [5]. Этот сдвиг очень важен для нас в плане возможности формирования концепции конвергентного цифрового двойника горнопромышленного предприятия, как системы, в состав которой входят не только технологические производственные комплексы, но и окружающая среда, взаимодействие с которой должно стать неотъемлемой частью цифрового двойника горнопромышленного комплекса.

Рассмотрим некоторые базовые понятия новых информационно-вычислительных технологий, связанные с концептом цифрового двойника.

Аналитики Forrester [6] определяют **цифрового двойника** как процесс создания (и существования) реального физического объекта в абстрактной цифровой форме, который выступает в качестве посредника для любой связи с реальным устройством, обобщенно - системой.

Отметим, что технология цифровых двойников применима не только при тестировании продукта или компонента технической системы. Цифровой двойник способен анализировать и моделировать условия реального мира и отвечать на операционные изменения. Он делает это используя данные и информацию о принципах функционирования частей системы и возможного реагирования на ее внутреннее состояние и окружающие условия, используя показатели датчиков, установленных и работающих в реальном мире, передающих информацию

в цифровой двойник. Цифровой двойник функционирует как агент целого ряда реальных экспертов, устройств и средств мониторинга, таких как сенсоры.

Базовая концепция двойников не сложна для понимания: мониторинг физического объекта осуществляется на основе замкнутого цикла информационного обмена между ним и его виртуальной моделью (тем самым цифровым двойником), как показано на рис. 1

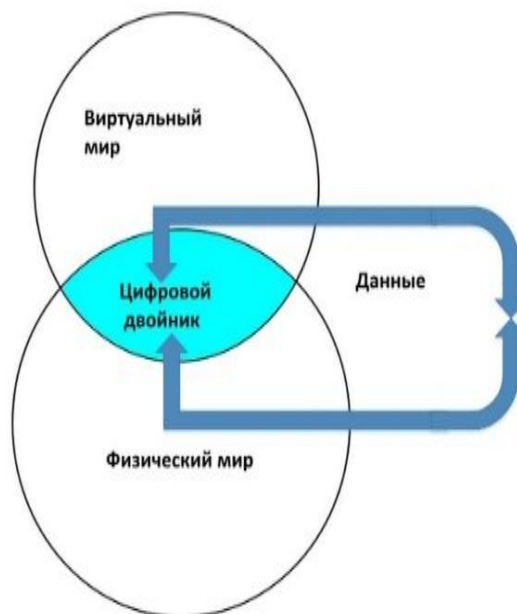


Рис. 1. Концептуальная схема цифрового двойника.

Технологии создания цифровых двойников связаны с их типами, которые описаны, например, в работе [1]. Определены три типа двойников: цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI) и агрегированные двойники (Digital Twin Aggregate, DTA).

DTP-двойник это прототип некоторого физического объекта, и он включает в себя информацию, которая нужна для создания физической версии объекта и описание его свойств. Для производственных задач, она может состоять из 3D модели объекта, условий для его создания, технологических регламентов, необходимых материалов и т.п. Чаще всего этот тип двойника используется в машиностроении, авиастроении и других отраслях, где может осуществляться сборка целого из разнообразных частей.

DTI-двойники экземпляры применяются в том случае, когда имеется конкретный физический объект, с которым двойник остается связанным на протяжении всего времени жизни (жизненного цикла). Двойники этого типа обычно содержат 3D-модель с характерными параметрами, спецификации на материалы, используемые при создании физического объекта, спецификации технологических процессов и операций, которые применяются при создании этого физического объекта, а также результаты любых его тестовых испытаний, архив сервисного обслуживания, включая замену отдельных деталей, текущие и прогнозируемые значения параметров мониторинга и другие параметры, возникающие в процессе производства и эксплуатации.

DTA-двойники агрегаторы определяются как распределенная информационно-

вычислительная система, организующая доступ ко множеству цифровых двойников-экземпляров, чаще всего, одного типа. Эта система собирает данные с разных экземпляров для того, чтобы совершенствовать внутреннее, цифровое представление об их динамике в процессе эксплуатации, для чего может посылать им потоковые (активные и пассивные) запросы, получая необходимую информацию для последующего воздействия на их состояние.

Сегодня практически все ведущие мировые корпорации, такие как Siemens, Oracle, IBM, Microsoft, General Electric, ANSYS, создали реальные системы, на основе цифровых двойников, использующиеся для различных приложений. В России наиболее известной такой системой является платформа CML-Bench, разработанная в Инжиниринговом Центре СПбПУ ГК CompMechLab [7]. Чаще всего эти системы становились продолжением, развитием уже имевшихся систем либо мониторинга, либо компьютерного моделирования, либо анализа больших данных.

Технологии сбора и анализа больших данных, как важнейшая составляющая цифровых двойников, приобрели большую популярность, особенно в свете перспектив развития Интернета вещей (IoT) (см., например, [8]). Несмотря на это, следует отметить достаточностораживающий факт: по мнению Алексея Боровкова [9] многие мировые компании уже генерируют больше информации, чем могут обработать, извлекая оттуда важные сведения, поэтому генерировать нужно лишь содержательные данные, очищенные от мусора и шума. Нецелесообразно сплошь оснащать производство различными умными датчиками, потому что это неминуемо приведет к терабайтам, которые мы не будем успевать обрабатывать. И здесь цифровые двойники могут помочь, позволяя определить уже на стадии создания информационно-вычислительной модели (цифровой тени), критические зоны, например, связанные с интенсивным техногенным воздействием, в том числе на окружающую среду, и соответствующие им характеристики, которые позволят на ранних стадиях развития горного производства принять необходимые компенсационные решения.

Создание систем горнопромышленного мониторинга на основе технологий цифровых двойников. Современные системы мониторинга, в своем большинстве, создаются на основе инфраструктуры пространственных данных определяемой в соответствии с распоряжением Правительства РФ №1157-р от 21 августа 2006 года как информационно-телекоммуникационная система, обеспечивающая доступ пользователей к национальным распределенным ресурсам пространственных данных, а также распространение и обмен в сети Internet, в целях их производства и использования. Наиболее общее определение систем мониторинга, как систем регламентированного сбора данных, организации их структурированного хранения, обработки и анализа с целью принятия необходимых управляющих решений на сегодняшний день должно перетерпеть некоторые изменения, в том числе и связанные с появлением и развитием технологий цифровых двойников.

а

б

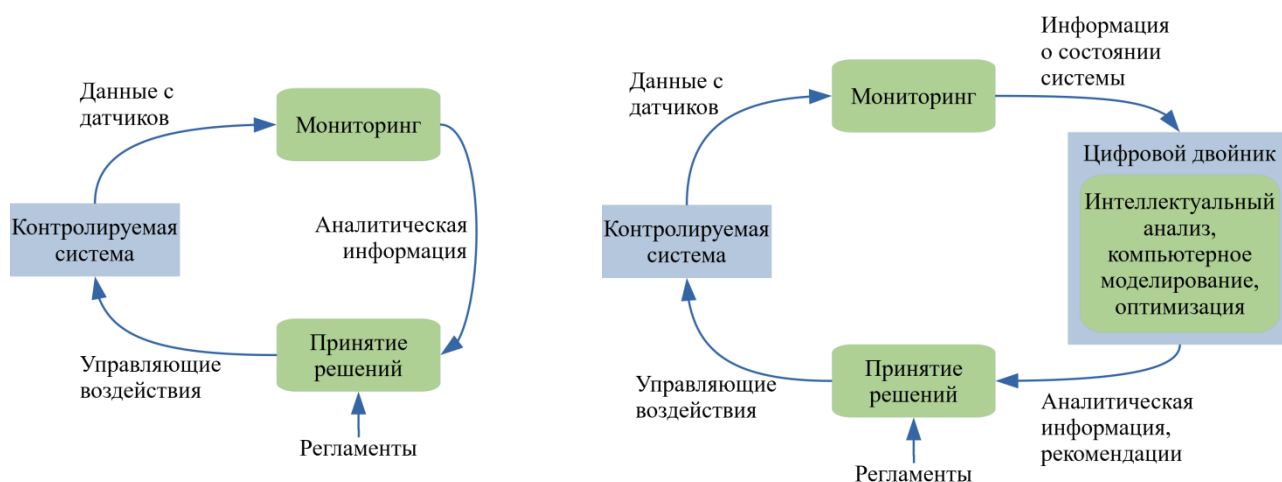


Рис. 2. Традиционная схема контроля системы (а) и схема с цифровым двойником типа DTI (b)

В традиционной интерпретации системы мониторинга являются получателями и обработчиками данных с датчиков и комплексов датчиков, фиксирующих параметры реальных объектов. Система мониторинга поставляет информацию для последующего анализа системой поддержки принятия решений и человеком, а само принятие решений осуществляется путем применения описанных в регламентах правил. Расширение этой схемы цифровым двойником позволяет применить и при анализе, и при принятии решений современные технологии компьютерного моделирования, совмещенные с анализом многомодальных данных, вариантным прогнозированием и решением обратных, оптимизационных задач. Разницу между этими схемами можно увидеть на рис. 2.

Цифровой двойник принимает на себя часть функций по мониторингу, а именно решает задачу накопления и анализа данных, дополняя традиционные инструменты обработки и анализа аугментацией данных с помощью компьютерного моделирования и целостным анализом состояния системы на основе ее полной информационной модели. Также цифровой двойник может принимать на себя часть функций по принятию решений, вырабатывая рекомендации на основе прогнозного моделирования, вариантного анализа и оптимизации «налету» поведения системы по заданным критериям.

Примером расширения возможностей и повышения качества управления горнопромышленным производством с помощью технологии цифровых двойников может служить следующая иллюстрация. Простейшим регламентом принятия решения об эвакуации персонала из шахты при возникновении угрозы взрыва вследствие накопления, например, метана является достижение некоторой предельной его концентрации по данным какого-либо датчика в системе наблюдения. Наличие цифрового двойника, в котором есть не только информация о текущей концентрации газа, но и история этой информации, и компьютерная модель, позволяющая прогнозировать возможное развитие ситуации с накоплением и распределением газа в шахте, дает возможность заблаговременно предсказать критическую ситуацию и предложить меры по ее предотвращению или смягчению последствий, например, путем изменения режима работы вентиляционной системы, приостановки «искрообразующих» работ, эвакуации персонала.

Аналогичные примеры можно построить и для процессов воздействия горнопромышленных комплексов на внешнюю среду, в первую очередь - экологическую обстановку. В

этом отношении традиционные системы контроля горнопромышленных производств будут демонстрировать еще меньшую эффективность. Традиционная система мониторинга горнопромышленного комплекса никак не связывается с изменением параметров окружающей среды. Эта система не знает и того, что происходит с аналитической информацией, которую она генерирует, отсутствует обратная связь. И этот факт существенным образом сказывается на качестве управляющих решений, так как они выполняются с запаздыванием, даже в случае систем, работающих в режиме реального времени. Кроме этого, традиционные системы мониторинга, в большинстве своем, рассчитаны на традиционные-же пространственные данные, получаемые посредством точечных замеров. Без применения компьютерных и математических моделей невозможна качественная интерполяция и экстраполяция таких данных на большие площади, характерные для горнопромышленных комплексов и систем их мониторинга (геомеханического, технологического, экологического и др.).

Использование технологий цифровых двойников поможет в создании систем мониторинга, более адекватно анализирующих результаты наблюдения за сложными антропогенными и природными объектами, а также их комплексами. Они будут способствовать и улучшению контроля над природно-антропогенными системами, используя сложные комплексы средств измерения, генерирующие разнородные и мультимодальные данные, методы искусственного интеллекта и новейшие математические и компьютерные модели. Для конкретизации рассмотрим пример концепции системы экологического мониторинга предприятий горнопромышленного комплекса в угольной промышленности.

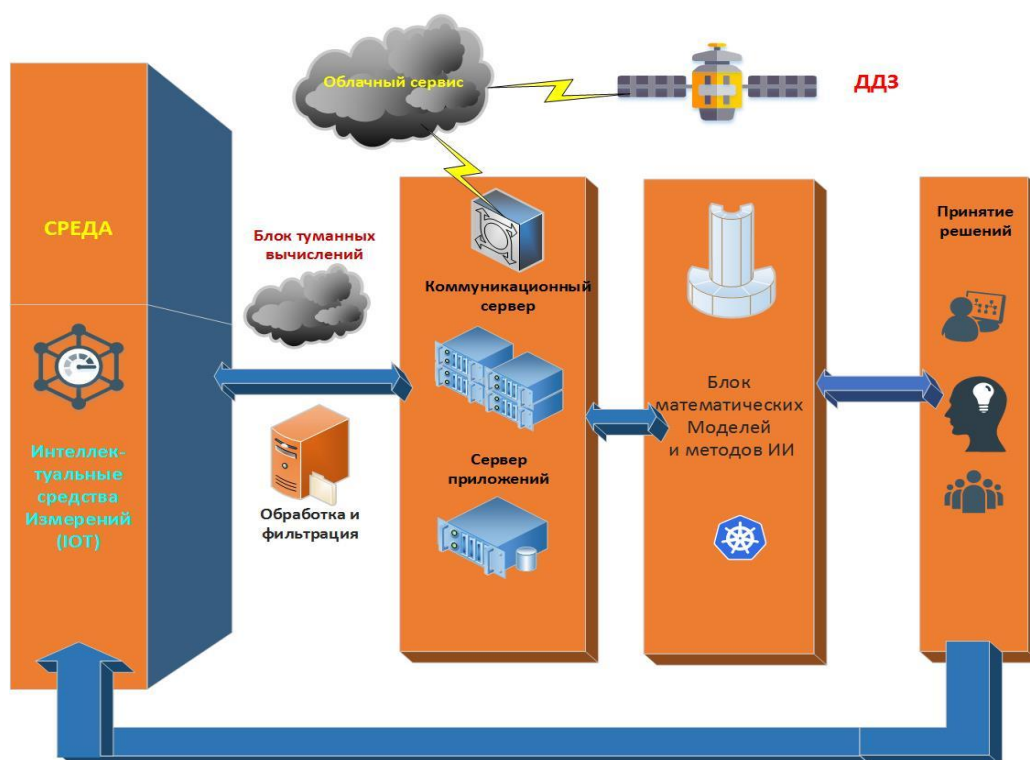


Рис. 3. Концептуальная схема системы экологического мониторинга на основе цифрового двойника

На рис. 3 представлена схема системы экологического мониторинга с использованием технологий цифровых двойников, уточняющая технологическими, реализационными аспектами общую схему на рис. 2б.

В горнопромышленном комплексе, расширенном включением в него окружающей экосистемы, множество как однотипных, так и разнотипных объектов, наблюдение за которыми осуществляется и с помощью датчиков, расположенных непосредственно на объектах, и с помощью дистанционного зондирования. Поэтому цифровой двойник такого комплекса относится к ДТА типу, представляя собой распределенную информационно-вычислительную систему, состоящую из нескольких информационно-связанных блоков, организующих и обеспечивающих доступ ко всем элементам цифрового двойника. Система может посылать потоковые и выборочные запросы, получая необходимую информацию о комплексе для последующего воздействия на его состояние, что обозначено на схеме обратной связью от конечного блока принятия решений и двойными связями между всеми элементами двойника. Дополнительно введенный блок туманных вычислений предназначен для оптимизации потоков данных, фильтруя на лету данные с датчиков, передавая далее только содержательные данные, освобожденные от “мусора” и шума.

Заключение. Рассматривая цифровые двойники как технологию для эволюции традиционных подходов к контролю сложных систем, реализованных, например, в форме АСУ ТП, можно строить системы мониторинга и управления нового типа, включающие расширение наборов анализируемых данных с помощью компьютерного моделирования, внедрение более сложных аналитических инструментов на основе методов искусственного интеллекта, учитывающих результаты прогнозного моделирования, а также новые системы поддержки принятия решений и контроля состояния систем, опирающиеся на современные математические методы решения обратных задач, задач оптимизации и принятия решений.

Горнопромышленные комплексы, как большие и сложные системы с огромным влиянием на экосистему, должны рассматриваться в совокупности с этой экосистемой и со взаимным влиянием друг на друга. Это расширяет возможности по поиску и построению сбалансированной системы, учитывая и производственно-экономические потребности горнопромышленного комплекса, и экологические аспекты, влияющие на качество жизни населения и устойчивость социально-природно-техногенной системы в целом.

В связи с этим показана необходимость и целесообразность, а также пути совершенствования традиционных систем горнопромышленного мониторинга за счет внедрения в них цифровых двойников ДТА-типа и представлена концепция такой системы мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА.

- [1] Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication – LLC, 2014, 7 p.
- [2] Marr, Bernard (Mar 6, 2017). "What Is Digital Twin Technology - And Why Is It So Important?". Forbes.com. Available at <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/03/06/what-is-digital-twin-technology-and-why-is-it-so-important/> (Accessed Nov 20, 2019).
- [3] Shoumen Palit Austin Datta Emergence of Digital Twins // Journal of Innovation Management (2017). No. 5. Pp. 14-34.
- [4] Топ-10 трендов технологий искусственного интеллекта (ИИ) в 2018 году. Доступно по адресу <http://usblogs.pwc.com/emerging-technology/top-10-ai-tech-trends-for-2018/> (дата доступа 20.11.2019)
- [5] Saddik, A. El (April 2018). "Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies". IEEE MultiMedia. 25 (2): 87–92. doi:10.1109/MMUL.2018.023121167. ISSN 1070-986X.
- [6] Digital Twins Combine Enterprise Data And IoT To Drive New Business Value. *Paul Miller, Principal Analyst* Oct 15, 2019. <https://go.forrester.com/blogs/digital-twin-iot-new-business-value/> (Accessed Nov

20, 2019).

- [7] Цифровое производство: Методы, экосистемы, технологии. Рабочий доклад Департамента Корпоративного обучения Московской школы управления СКОЛКОВО. 03.2018. Доступно по адресу http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2018/04_april/12/cifrovoye-proizvodstvo-032018.pdf (дата доступа 20.11.2019).
- [8] Yang, Chen; Shen, Weiming; Wang, Xianbin (January 2018). "The Internet of Things in Manufacturing: Key Issues and Potential Applications". IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine. 4 (1): 6–15. doi:10.1109/MSMC.2017.2702391
- [9] Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности. Доступно по адресу <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> (дата доступа 20.11.2019).