

ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

И. В. Артемов, М. Б. Носырев

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация: Технология цифровых двойников (ЦД) является относительно новым методом повышения эффективности и удобства выполнения многих технологических операций горного производства. Раскрыт термин «цифровой двойник», его происхождение и то, что под ним понимают разные исследователи. Дано несколько видов классификаций и схем структуры цифровых двойников, проанализированы примечательные случаи успешного применения данной технологии в горнодобывающей отрасли.

Ключевые слова: цифровой двойник, цифровая трансформация, горная промышленность, трехмерная модель, модель процесса

Благодарность: Коллектив авторов выражает благодарность преподавательскому и руководящему составу Уральского государственного горного университета.

Для цитирования: Артемов И. В., Носырев М. Б. Технология цифровых двойников и ее применение в горнодобывающей промышленности. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 38-43. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_38_43.

THE DIGITAL TWIN TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION FOR MINING INDUSTRY

I. V. Artemov, M. B. Nosyrev

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation

Introduction. The material production is a main component in almost any kind of economy. It is always a high-tech industry, that must meet the requirements of efficiency, performance and competitiveness. To satisfy all these demands the material industry often needs to be transformed into digital industry. This process consists of the development and application of digital platforms, digital twins of real objects and processes, as well as the transition to cyber-physical systems. These global changes are accompanied by the development of fundamentally new business processes and business models at all levels.

The development and application of digital twins is an advanced technology (although it is based on quite old ideas), it is an integrator of “end-to-end” digital technologies and new production capabilities (primarily digital design and modeling). It provides a significant contribution to the creation of globally competitive next-generation products in the shortest possible time.

Research results: In this article we present a description of Digital Twin term in its diversity. Multiple kinds of digital twin’s classification were given and also we introduce many examples of this technology’s usage in mining industry.

Conclusion. As we can see, the digital twin idea is relatively young, but it is based on some quite old principles of cybernetics and modeling. Since the term was formally introduced, many practical applications of digital twins have been found.

Resume. The increasing amount of scientific advancements made the effective usage of digital twins possible. They are successfully applied in mining industry, and not only for educational purposes – it helps to increase the manufacturing productivity and avoid some unintended consequences in rock mining.

Keywords: digital twin, digital transformation, mining industry, 3D-model, process model

Gratitude: The team of authors expresses gratitude to the teaching and management staff of the Ural State Mining University.

For citation: Artemov I. V., Nosyrev M. B. The digital twin technology and its application for mining industry. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):38-43. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_38_43.

Введение

Практически в любой экономике центральное место отводится материальному производству — высокотехнологичной промышленности, отвечающей требованиям эффективности, производительности труда и конкурентоспособности в глобальном смысле. Для того что-

бы удовлетворить этим требованиям, зачастую приходится прибегать к внедрению большого количества цифровых технологий в высокотехнологичной промышленности. Это заключается в разработке и применении цифровых платформ, цифровых двойников (Digital Twin) реальных объектов и процессов, а также в осуществлении перехода к киберфизиче-

ским системам. Эти глобальные изменения сопровождаются развитием принципиально новых бизнес-процессов и бизнес-моделей на всех уровнях.

Разработка и применение цифровых двойников — это передовая технология (хотя она и основана на достаточно старых идеях), является интегратором «сквозных» цифровых технологий и новых возможностей производства. Использование цифровых двойников обеспечивает весомый вклад в создание конкурентоспособной продукции нового поколения в кратчайшие сроки [1].

Цель исследований — соотнести различные подходы к терминологии и классификации цифровых двойников, кратко описать сходства и различия пониманий. Найти и выделить группы способов эффективного практического применения цифровых двойников в горнодобывающей промышленности и смежных отраслях.

Материал и методы исследований

В данной работе были найдены и проанализированы новые публикации по тематике цифровых двойников и цифровой трансформации, в которых делался акцент на полезном эффекте от их применения в горнодобывающей отрасли.

Результат работы

В результате удалось выделить несколько подходов к пониманию и классификации цифровых двойников, а также несколько логических групп применения данной технологии в горном деле.

Что такое цифровой двойник?

Концепция физического двойника, существовавшая до цифровых двойников, является довольно старой и относится к программе NASA «Аполлон». Тогда были построены два одинаковых космических аппарата, причем один из них остался на Земле и получил название «Двойник». «Двойник» использовался для точного отражения условий полета, запуска моделирования и таким образом помогал астронавтам найти наилучшие возможные решения возникавших перед ними задач. Естественно, создание физического двойника каждого актива или объекта является дорогостоящим и непрактичным. Из-за этого идея физического двойника была трансформирована до создания цифрового двойника.

Важно отметить, что цифровые двойники в космической отрасли применяются и в России. К примеру, в 2023 году специалисты из Роскосмоса упоминали о внедрении цифрового двойника для управления отечественным космическим спутником [2].

Майкл Гривс впервые представил идею ЦД в 2003 году как цифровую информационную конструкцию физической системы, которая оптимальным образом включает в себя всю информацию, необходимую для выполнения поставленной задачи, и связана с рассматриваемой физической системой [3, 4].

Основными компонентами ЦД являются:

- 1) физический компонент,
- 2) виртуальная модель,
- 3) данные, связывающие компоненты.

Поток данных от физического компонента к виртуальной модели требует обработки для преобразования в полезную информацию. Поток данных из виртуального мира в физический представляет собой уже обработанную информацию, которую можно использовать для управления физическим объектом.

Первое формальное определение ЦД было дано в 2012 году как интегрированное мультифизическое, многомасштабное, вероятностное моделирование транспортного средства или системы, которое использует лучшие доступные физические модели, данные датчиков, историю их изменений и т. д., чтобы отразить функционирование своего двойника. Хотя эта концепция возникла в аэрокосмической отрасли, она получила распространение во многих других отраслях, таких как производство и строительство [5].

Если проанализировать различные трактовки термина «цифровой двойник», то окажется, что это определение лежит между двумя крайностями: от широкого толкования (ЦД — это все проекты, где создают любую цифровую копию любого объекта) до самого узкого толкования, когда ЦД называют решение, которое соответствует выполнению целого ряда жестких требований, направленных на повышение уровня соответствия ЦД реальному объекту: моделирование материалов на микро- и макроуровне, одновременное наличие разных видов моделей (статистической, физической и др.) [6].

Данный вывод может быть выражен в виде формулы с аппаратом теории множеств:

$$M_{copy} = M_{multi} \cup M_{predict} \cup M_{industry}$$

где M_{copy} — обобщенное определение цифрового двойника;

M_{multi} — множество определений, где ЦД считается мультидисциплинарной моделью, получающей данные об объекте в реальном времени;

$M_{predict}$ — множество определений, где ЦД считается моделью для прогнозирования поведения своего физического прообраза;

$M_{industry}$ — множество определений, где ЦД считается любой цифровой копией промышленного изделия.

Неоднозначность в понимании термина «цифровой двойник» не помешала исследователям и разработчикам в проработке и практическом применении данной концепции, что будет видно далее.

Классификация цифровых двойников

Майкл Гривс разделил цифровых двойников на следующие типы [3]:

1) прототип цифрового двойника (Digital Twin Prototype). Содержит высокую степень точности, но при этом не включает в себя результатов измерений, поступающих от конкретного реального объекта. Прототип обычно включает требования к продукту, 3D-модель с полной аннотацией, спецификацию материалов, спецификацию процессов, спецификацию утилизации;

2) экземпляр цифрового двойника (Digital Twin Instance). Описывает конкретный реальный объект, с которым экземпляр остается связанным на протяжении всего жизненного цикла. Экземпляр включает данные о настройках модели, параметрах управления, информацию с датчиков и исторические сведения для изделия, устройства или процесса. С использованием экземпляров возможно прогнозирование состояния;

3) агрегат цифровых двойников (Digital Twin Aggregate) — это система, объединяющая все экземпляры ЦД, которые могут и не обладать независимой уникальной структурой данных. Вместо этого экземпляры могут обмениваться данными друг с другом.

Данная классификация — не единственная.

К примеру, General Electrics классифицирует ЦД по уровню сложности и выделяет четыре следующих уровня [6]:

1) ЦД компонента (например, ЦД шестеренки) может использоваться, чтобы заранее сигнализировать о возможном выходе из строя этого компонента;

2) ЦД актива (например, ЦД двигателя внутреннего сгорания, электропривода или бензонасоса) состоит из одного или нескольких ЦД компонентов и может анализировать ресурс узла в целом;

3) ЦД комплексного объекта (например, ЦД экскаватора или буровой установки) способен оптимизировать работу всей системы исходя из массива показателей;

4) ЦД процесса обычно является двойником еще более сложного объекта. Он дает представление о наборе действий, составляющих большой производственный процесс. Цифровой двойник процесса может быть построен на базе набора двойников активов или систем.

Применение цифровых двойников в горной промышленности

Цифровые двойники широко применяются в области добычи ископаемых, о чем свидетельствует большое количество публикаций с сообщениями о реализованных и успешно внедренных системах [7]. Общий подход применения цифрового двойника для горнодобывающей техники (схема подходит и для других производственных отраслей) представлен на рисунке.

Физический мир (физическая среда) состоит из физического объекта или процесса, сенсоров и актуаторов. Цифровая среда состоит из самого цифрового двойника, базы данных, систем машинного обучения и цифровой обработки данных. Обе среды взаимодействуют через коммуникационный элемент, который обладает несколькими интерфейсами (Wi-Fi, Bluetooth, проводное подключение). Для конечного пользователя такая архитектура предоставляет возможности постоянного мониторинга и визуализации результатов [8].

Прежде всего ЦД широко используются при производстве техники, в том числе предназначенной для добычи и транспортировки горной породы. Большинство ЦД, которые используются в реальном производстве, находятся на той стадии развития, когда ЦД взаимодействует со своим физическим оригиналом только для того, чтобы оставаться

с ним в состоянии синхронизации. Эти ЦД также могут служить шлюзом для других приложений (например, аналитических). Если аналитическое ПО обнаруживает какую-либо аномалию, то сигнал поступит к еще одному внешнему приложению, а затем – на реальный объект [9].

В [10] описано использование ЦД для численного моделирования потока сыпучих материалов при добыче угля. В этом примере вагонетки перевозят добытый уголь от месторождения к пункту его приема. Из каждой вагонетки выгружается сырье, которое затем попадает на свой конвейер, а далее поступает на питатель, который подает фрагменты угля в дробильную установку. При этом если разгружается одновременно более одной вагонетки, то общий показатель массового расхода может превысить допустимый уровень для дробильной установки. Это приводит к застреванию фрагментов угля и повреждению оборудования. Лучшим подходом к анализу и выявлению таких ситуаций, по мнению инженеров, является создание цифрового двойника с последующим точным численным моделированием.

В [11] цифровой двойник используется для принятия технологических решений в процессе отработки очистного забоя угольной шахты при добыче угля. Решение было актуальным, т. к. внешней средой по отношению к процессу очистного забоя является угольный пласт, у которого тяжело измерить геологические и механические параметры непосредственно в точке нахождения очистного комбайна. В результате исследования авторами была получена имитационная модель, включающая модели горных машин и модель угольного пласта, которые связаны между собой.

В [12] инженеры также используют ЦД для мониторинга состояния шахт.

Помощь цифрового двойника в увеличении эффективности производства описана и в [13]. Автор упоминает использование цифрового двойника для мельницы измельчения золотосодержащей руды. Поскольку на золотообогатительных фабриках большая доля электроэнергии расходуется именно мельницами на участках измельчения руды, то оптимизация процесса, выполненная с использованием ЦД, имела серьезный экономический эффект. Цифровой двойник отвечал за

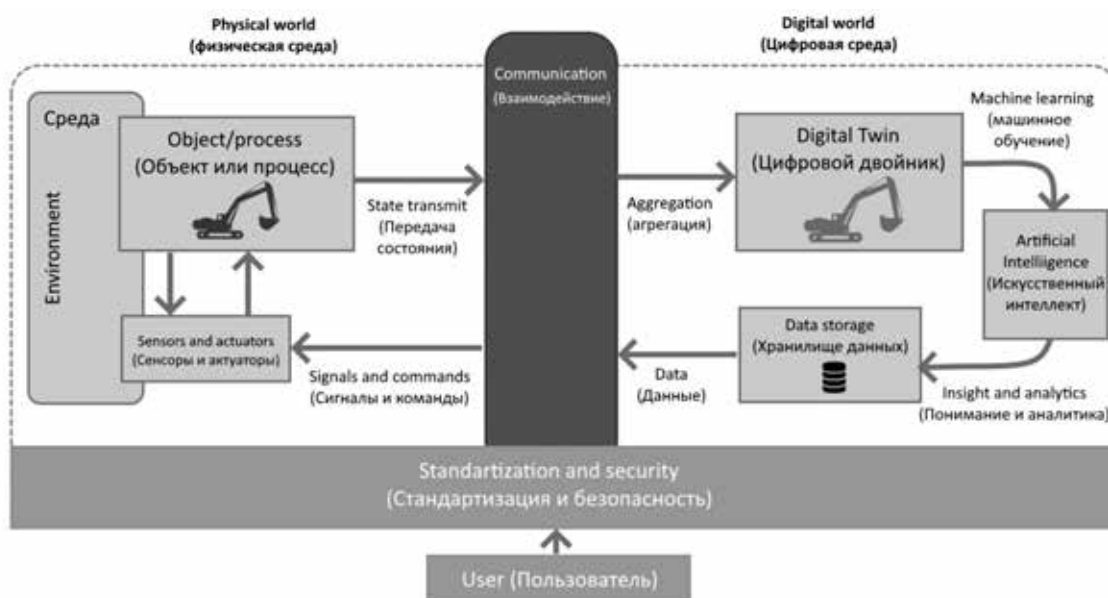


Рис. Общая архитектура взаимодействия компонентов цифровых двойников

Fig. The overall architecture of digital twins' components' interactions

определение режима, в котором работает мельница, оптимизацию графика плановых ремонтов, прогнозирование износа компонентов.

В [14] идет речь об использовании цифровых двойников для обучения студентов (в частности — металлургического профиля). Среди доводов в пользу такого решения приводится то, что обучение на реальных установках является дорогостоящим, а также связанным с риском для жизни (студентом потребовалось бы изучать и соблюдать большое количество требований безопасности). Описывается имеющаяся реализация цифрового двойника в виде интерактивной 3D-модели в виртуальной реальности.

Похожие цели преследуют авторы [15]. В работе описана система поддержки для инструкторов по управлению экскаваторами, которая основана на идее цифрового двойника. В созданной системе использовались несколько видов обратной связи от реального экскаватора к его двойнику: положение рукояти, скорость движения ковша, траектория загрузки ковша и точка его разгрузки.

В [16] также упоминается пример разработки цифрового двойника для экскаватора за авторством фирмы ConXR Development. Авторы задались целью разработать подобную систему, чтобы работа на экскаваторе стала возможна в удаленном формате (целесообразность была обусловлена вирусом COVID-19).

Симуляция функционирования одноковшового экскаватора была частично воплощена в имитационном комплексе EKG-18R [17]. В частности, были смоделированы кинематика экскавации и перенос энергии с основных приводов. Принцип действия комплекса основан на вычислительной модели экскаватора, которая максимально близка к реальному оборудованию. Причем в модели были учтены возможные разновидности установленных электрических приводов.

Авторы [18] раскрывают концепцию использования цифровых двойников тяжелой горнодобывающей техники в сочетании с динамически формируемой моделью окружающего пространства для предотвращения столкновений спецтехники. По словам разработчиков системы, наезд крупногабаритной техники на легковой автотранспорт и людей является наиболее распространенным в статистике

несчастных случаев при добыче пород. Большинство подобных инцидентов происходит из-за плохого обзора оператора спецтехники.

Основной акцент в [19] сделан на технической реализации того, как именно можно эффективно обрабатывать данные с датчиков экскаватора, чтобы точно и своевременно обеспечивать обновление состояния его цифрового двойника. Для отслеживания «глобальной» позиции техники в пространстве авторы используют GPS. Для относительных позиций предлагается использовать акселерометры и лазерные приборы на кабине и стреле экскаватора.

В [20] описано создание цифрового двойника («визуального прототипа») рабочего места оператора в кабине карьерного экскаватора, что использовалось для сбора и анализа данных об эргономических характеристиках. Кроме ЦД кабины разработчикам потребовалось применить и модель условного машиниста, «манекен» которого помещается в виртуальную кабину ЦД экскаватора.

Заключение

В сообществе исследователей встречается мнение о том, что идея цифрового двойника, в сущности, не несет в себе ничего нового, т. к. можно сказать, что это просто продолжение техники применения модели в сочетании с процессами обратной связи. Разница лишь в том, что это делается в условиях более совершенных технологий и с использованием технических возможностей, которые не были доступны ранее (например, машинное обучение, чувствительные сенсоры, широкополосная передача данных).

Действительно, идея цифровых двойников, по сути, основана на классической идее кибернетики, в которую были привнесены такие элементы, как постоянное добавочное обучение имитационной модели, техники прогнозирования состояния объекта-оригинала [21].

Как видим, новые технологические условия позволили успешно использовать цифровых двойников во многих сферах горнодобывающей отрасли. ЦД помогают обучать операторов, совершенствовать эргономику элементов управления, предотвращать аварии и увеличивать эффективность многих технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боровков АИ, Гамзикова АА, Кукушкин КВ. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. СПб.: Политех-Пресс, 2019. 62 с. [Borowkov AI, Gamzikova AA, Kukushkin KW. Digital twins in high-tech industry. Saint-Petersburg, 2019 (In Russ)].
2. Ячменникова Н. Цифровой двойник спутника: 3D-технология будет управлять космическими аппаратами на орбите [Электронный ресурс]. Роскосмос. URL: <https://www.roscosmos.ru/39013/> (дата обращения: 18.07.2024). [Yachmennikova N. Digital twin of a satellite: 3D-technology will control space equipment on an orbit. Available from: <https://www.roscosmos.ru/39013/> 2019 (In Russ)].
3. Grieves M, Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Luxembourg, 2017:85-113.
4. Uhlemann T, Lehmann C, Steinhilper R. The digital twin: Realizing the cyberphysical production system for industry 4.0. *Procedia CIRP*. 2017;61:335-40.
5. Agrawal A, Fischer M, Singh V. Digital Twin: From Concept to Practice. *Journal of Management in Engineering*. 2022;38(3):112-57.
6. Прохоров А, Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: АльянсПринт, 2020. 401 с. [Prokhorov A, Lisachev M. Digital twin. Analysis, trends and worldwide experience. Moscow, 2020. (In Russ)].

7. Трегуб ОС, Бахаева ЮВ, Варламов ПП. Использование цифровых двойников в горнодобывающей промышленности. *Образование. Наука. Производство: мат-лы XIV Межд. молод. форума*, Белгород, 13–14 октября 2022 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2022. С. 164–168. [Tregub OS, Bakhaeva OV, Varlamov PP. The use of digital twins in the mining industry. *Education. The science. Production. Materials of the XIV International Youth Forum*. Belgorod, 2022:164-8 (In Russ)].
8. Botin-Sanabria DM, Mithaita AS, Peimbert-Garcia RE. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sens.* 2022;14:220-45. DOI: 10.3390/rs14061335.
9. Saracco R. Digital Twins: Evolution in Manufacturing. *IEEE Digital Reality*. Available from: <https://digitalreality.ieee.org/images/files/pdf/2022may-ebook-digitaltwins-manufacturing2.Pdf>.
10. Принслу В. Использование цифровых двойников при работе с сыпучими материалами. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2019;5(129):55–57. [Prinsloo V. Using digital twins when working with bulk materials. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2019;5(129):55-7 (In Russ)].
11. Окольнішников ВВ, Ордин АА, Рудометов СВ. Разработка цифровой модели очистного забоя угольной шахты. *Автометрия*. 2021;57(6):113–123. [Okolnishnikov VV, Ordin AA, Rudometov SV. Development of a digital model of a coal mine treatment face. *Autometry*. 2021;57(6):113–23 (In Russ)]. DOI: 10.15372/AUT20210612.
12. Kalinowski P, Dlugosz O, Kaminski P. Digital twin of the mining shaft and hoisting system as an opportunity to improve the management processes of shaft infrastructure diagnostics and monitoring. *IntechOpen*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/349658892_Digital_Twin_of_the_Mining_Shaft_and_Hoisting_System_as_an_Opportunity_to_Improve_the_Management_Processes_of_Shaft_Infrastructure_Diagnostics_and_Monitoring
13. Хитрых Д. Цифровые двойники: прошлое, настоящее и будущее. *Управление производством*. 2021;(4): 30–35. [Khitrykh D. Digital twins: past, present and future. *Production Management*. 2021;(4):30-5 (In Russ)].
14. Баранов ВН, Безруких АИ, Константинов ИЛ. Использование цифрового двойника для обучения студентов металлургического профиля. *Высшее образование в России*. 2022;31(2):135–148. [Baranov VN, Bezrukikh AI, Konstantinov IL. Using a digital twin to train metallurgical students. *Higher education in Russia*. 2022;31(2):135-48 (In Russ)].
15. Vahdatikhaki F, Scholtenhuis L, Doree A. Digital Twin-based Instructor Support System for Excavator Training. *41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2024)*. Available from: https://www.iaarc.org/publications/2024_proceedings_of_the_41st_isarc_lille_france/digital_twin-based_instructor_support_system_for_excavator_training.html.
16. Seaton H, Savian C, Sepasgozar S. Digital twins from design to handover of constructed assets. *RICS World Built Environment Forum*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/360157938_Digital_twins_from_design_to_handover_of_constructed_assets.
17. Shibanov DA, Ivanov SL, Shishkin PV. Digital technologies in modeling and design of mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1753:206-12. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012052.
18. Рентюк В. Система предупреждения столкновений Visionary-B от Sick для спецтехники. *Control Engineering*. 2021;93(3):50–56. [Rentyuk V. Visionary-B collision avoidance system from Sick for special equipment. *Control Engineering Russia*. 2021;93(3):50-6 (In Russ)].
19. Talmaki S, Kamat VR. Sensor Acquisition and Allocation for Real-Time Monitoring of Articulated Construction Equipment in Digital Twins. *Sensors*. 2022;22:259-81. DOI: 10.3390/s22197635.
20. Великанов ВС, Ильина ЕА, Кочержинская ЮВ. Визуализация и анализ информации об эргономике рабочего места на основе компьютерного прототипирования конструкции кабины карьерного экскаватора. Вестник Череповецкого государственного университета. 2022;1(106):18–30. [Velikanov VS, Ilyina EA, Kocherzhinskaya YuV. Visualization and analysis of information about the ergonomics of the workplace based on computer prototyping of the design of a mining excavator cabin. *Bulletin of Cherepovets State University*. 2022;106(1):18-30 (In Russ)].
21. Дозорцев ВМ. Цифровые двойники в промышленной автоматизации – на пике моды или наступившее будущее?. *Автоматизация в промышленности*. 2022;(7): 3–14. [Dozortsev V. Digital twins in industrial automation - at the height of fashion or the coming future. *Automation in industry*. 2022;(7): 3-14 (In Russ)].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Артемов Иван Владимирович –
аспирант направления «Искусственный
интеллект и машинное обучение» УГГУ,
Уральский государственный горный университет,
г. Екатеринбург, Россия, Scopus Author ID:
57022242500, e-mail: imperfect-post@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Artemov –
specialist, postgraduate student, direction of Artificial
Intelligence and Machine Learning, Ural State Mining
University, Yekaterinburg, Russian Federation, Scopus
Author ID: 57022242500, e-mail: imperfect-post@
yandex.ruru



Носырев Михаил Борисович –
доктор технических наук, профессор, Уральский
государственный горный университет, г.
Екатеринбург, Россия, Scopus Author ID:
57194022210, e-mail: nosyrev.mb@mail.ru

Mikhail B. Nosyrev –
Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural State Mining University,
Yekaterinburg, Russian Federation, Scopus Author ID:
57194022210, e-mail: nosyrev.mb@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации / The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.