

# Развитие горно-геологической информационной системы в современных реалиях российской горнодобывающей отрасли

О.В. Наговицын✉

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

✉ o.nagovitsyn@ksc.ru

**Резюме:** Представлен подход к развитию горно-геологической информационной системы MINEFRAME. Состояние горнодобывающей отрасли, внешнеполитические вызовы диктуют применение цифровых технологий как фактор роста производительности труда и повышения промышленной безопасности. Одним из важнейших классов программно-го обеспечения, применяемых на горных предприятиях, являются горно-геологические информационные системы – это информационные системы комплексной автоматизации решения геологических, маркшейдерских и технологических задач при работе с векторными, каркасными и блочными моделями объектов горной технологии.

Горно-геологическая информационная система позволяет иметь надежные знания о месторождении на каждой из стадий разведки, проектирования и эксплуатации путем использования трехмерных геологических и геомеханических моделей, определения закономерностей распределения содержания полезных и вредных компонентов полезных ископаемых для всестороннего анализа сценариев последовательности разработки месторождения, выбора наиболее эффективных технологий и оборудования, оценки уровня риска проектных решений и их экономической эффективности.

Этот подход полностью соответствует направлениям цифровой трансформации, задекларированных правительством РФ, и представляет собой новый этап автоматизации и информатизации экономической деятельности и перехода на цифровые технологии.

**Ключевые слова:** цифровизация, оптимизация, геостатистика, ГИС, горные работы, геология, маркшейдерия

**Для цитирования:** Наговицын О.В. Развитие горно-геологической информационной системы в современных реалиях российской горнодобывающей отрасли. *Горная промышленность*. 2023;(5S):35–40. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-35-40>

# Development of mining and geological information system in the present-day situation in the Russian mining industry

O.V. Nagovitsyn✉

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ o.nagovitsyn@ksc.ru

**Abstract:** The article presents an approach to the development of the MINEFRAME mining and geological information system. The current situation in the mining industry, the foreign policy challenges require to use digital technologies as a driver to improve labor productivity and industrial safety. One of the most important classes of software used at mining enterprises are mining and geological information systems, i.e. the information systems that offer complex automation in solving geological, mine surveying and technological tasks when working with the vector, wireframe and block models of mining system facilities. The mining and geological information systems make it possible to have reliable knowledge of the deposit at each stage of exploration, design and operation of the mine through the use of 3D geological and geomechanical models, determination of distribution patterns for useful and harmful components of minerals for comprehensive analysis of scenarios of the sequence of field development, selection of the most efficient mining technologies and equipment, assessment of the risk level for design solutions and their economic efficiency.

This approach fully corresponds to the trends of digital transformation declared by the government of the Russian Federation and represents a new stage of automation and informatization of economic activities and transition to digital technologies.

**Keywords:** digitalization, optimization, geostatistics, mining and geological information systems, mining, geology, mine surveying

**For citation:** Nagovitsyn O.V. Development of mining and geological information system in the present-day situation in the Russian mining industry. *Russian Mining Industry*. 2023;(6S):35–40. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6S-35-40>

### Введение

Цифровые технологии стали значимой силой повышения производительности, уменьшения себестоимости и устойчивого развития в крупномасштабной добыче полезных ископаемых. Возможности, которые эти технологии открывают для горнодобывающей отрасли, приводят к минимизации влияния природных факторов, таких как неопределенность в определении элементов залегания полезных ископаемых (ПИ), приводящая к ошибкам в оценке запасов и выборе параметров технологии горных работ; повышению стабильности функционирования технологических процессов; вовлечению в разработку ПИ с худшим качеством; интеграции логистических операций и цепочек добыча–переработка–производство; повышению безопасности ведения горных работ; решению экологических проблем; привлечению талантливой молодежи, формированию представлений о горнодобывающем производстве как высокотехнологичном, привлекательном месте работы [1]. С течением времени стало понятно, что процесс цифровой трансформации, происходящий в условиях постоянных изменений геополитических условий и глобальной экономической неопределенности, сложен как с технологической, так и с социальной, культурной точек зрения.

Эти факторы приводят к тому, что горнодобывающие компании вынуждены принимать решения в области цифровизации, следуя сложным сочетаниям глобальных трендов развития информационных технологий, экспортных ограничений, наложенных на западных поставщиков цифровых решений, и усилий государственных органов, направленных на скорейшее обеспечение технологического суверенитета России [2]. Необходимо отметить, что государство достаточно планомерно и системно ведет работу по стимулированию разработки отечественного ПО, так, в 2015 г. было издано Постановление Правительства РФ №1236 «Об установлении запрета на допуск программного обеспечения, происходящего из иностранных государств, для целей осуществления закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд», в результате Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации был создан реестр российского программного обеспечения, нахождение в котором давало для отечественных поставщиков преимущество при работе с государственными учреждениями. Также поставка ПО из реестра по лицензионным соглашениям была освобождена от налога на добавленную стоимость. Теперь государство использует реестр для стимулирования перехода поставщиков ПО на работу с отечественными операционными системами. Совместимость с двумя российскими операционными системами станет обязательной для отечественного ПО при внесении в реестр отечественного программного обеспечения<sup>1</sup>. В настоящее время около 50% ПО из реестра не работает с российскими ОС. Новое требование по совместимости будет распространяться как на новое ПО, так и на уже включенное в реестр в рамках дополнительного переходного периода, предоставленного разработчикам.

Все это в полной мере влияет на развитие ПО, разрабатываемое для горнодобывающей отрасли. В ландшафте цифровых решений, применяемых на горных предприятиях, выделяется особый класс ПО – это горно-геологические информационные системы (ГИС). Они предназначены для

решения задач геологоразведки и разработки месторождений твердых полезных ископаемых; по структуре – это набор программных модулей и баз данных, обеспечивающих трехмерное моделирование объектов горной технологии, решение геологических задач и оценку запасов, маркшейдерское обеспечение, проектирование и планирование горных работ; обрабатываемые ими данные – точки, линии, полигоны, триангуляционные сети, объемные тела, блочные модели, регулярные и нерегулярные сети. ГИС реализует геоинформационный подход, основанный на обработке данных, которые имеют координатную привязку – трехмерные цифровые модели, являющиеся носителями информации о размерах, пространственном положении, физико-механических, технологических и технико-экономических свойствах объектов горной технологии [3; 4].

В Горном институте Кольского научного центра Российской академии наук ГИС, получившая название MINEFRAME, успешно развивается уже более 20 лет. Разработка велась в основном силами сотрудников института, наличие в котором широкого круга специалистов в области горной технологии и геоинформатики обеспечивает сбалансированное развитие основных направлений по автоматизации решения геологических, маркшейдерских и технологических задач [5; 6]. Тесный контакт с предприятиями, понимание специфики и реалий российской горной промышленности помогают развивать ГИС MINEFRAME с учетом текущих и перспективных потребностей горняков. Для коммерциализации достижений института в области ГИС было создано малое инновационное предприятие ООО «Лаборатория Майнфрэйм», оно взяло на себя основную нагрузку по разработке цифровых решений, обучению и технической поддержке пользователей, внедрению ПО на горнодобывающих предприятиях.

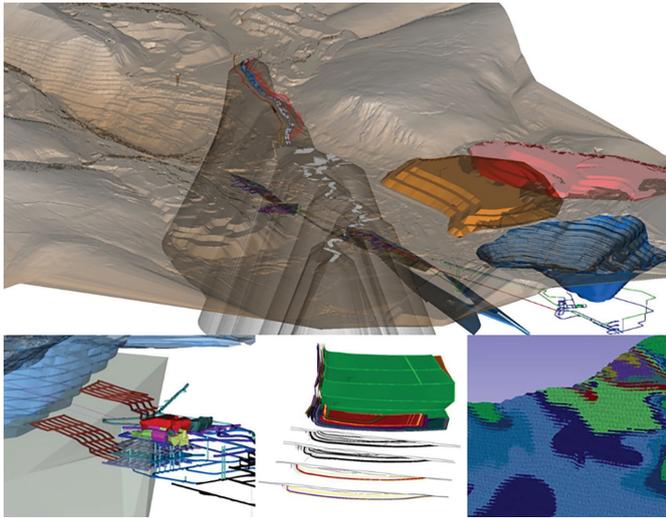
Изначально ГИС MINEFRAME задумывалась как информационная система комплексной автоматизации решения геологических, маркшейдерских и технологических задач при работе с векторными, каркасными и блочными моделями, обеспечивающими решение задач горной технологии в этих смежных областях инженерного обеспечения ведения горных работ (рис. 1):

**Геология** – формирование баз данных опробования, геометризация и 3D-визуализация результатов геологической разведки месторождения; построение каркасных моделей рудных тел, пластов и геологических нарушений; построение блочных моделей и интерполяция на основе геостатистического исследования месторождений; определение качественных показателей в выемочных единицах, оценка запасов и др.

**Маркшейдерия** – формирование и работа с базой данных точек съёмочного обоснования; обеспечение реализации проектных решений, представленных 3D-моделями виртуальных объектов, в реальном пространстве ведения горных работ; формирование 3D-моделей на основе данных инструментальных замеров реальных объектов; интеграция маркшейдерских инструментов с функциональными, например, обеспечение БВР, проходки, закладочных работ.

**Проектирование и планирование горных работ** – проектирование выработок, объектов подземной и наземной инфраструктуры в режиме создания их 3D-моделей; календарное планирование горных работ на основе моделирования проходки подземных выработок и закономерностей развития карьерного пространства, последовательности отработки выемочных единиц; оперативное

<sup>1</sup> Устинова А. Совместимость с двумя российскими операционками станет обязательной для отечественного софта. Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2023/06/13/979863-sovmestimost-s-dvumya-rossiiskimi-operatsionkami-stanet-obyazatelnoy>



**Рис. 1**  
Типичные модели геологической среды, открытых и подземных горных работ

**Fig. 1**  
Typical models of geologic environment, surface and underground mining operations

планирование и управление горными работами на основе мониторинга и диспетчеризации горнотранспортного обслуживания.

Таким образом, сейчас в рамках развития ГИС MINEFRAME созданы инструментальная основа для создания цифровых моделей объектов горной технологии и функциональные инструменты для обеспечения основных горнотехнологических бизнес-процессов при добыче минерального сырья.

В настоящее время на российском рынке в нише ГИС преобладают зарубежные решения, что снижает технологический суверенитет страны и препятствует активному участию российских специалистов в развитии этого стратегически важного класса программного обеспечения. Поэтому развитие функциональных возможностей, внедрение и развитие независимого от санкционных рисков российского платформенного решения такого ПО, как ГИС MINEFRAME, является насущным решением задачи импортозамещения.

Анализ текущего состояния функционала основных ГИС и смежных с ними информационных систем, запросы технологических лидеров горнодобывающей отрасли и видение перспектив развития цифровых технологий позволили выделить широкий набор проблем, требующих решения. Это и общие аспекты – такие как системная интеграция с цифровой инфраструктурой горного предприятия; управление горно-геологическими данными и аналитика; кибербезопасность; цифровизация обучения горных инженеров. Это и направления совершенствования и разработки прикладного функционала – геостатистика и неявное геологическое, в том числе стратиграфическое моделирование; оптимизаторы планирования горных работ для различных способов и систем разработки на основе динамических имитационных моделей; оптимизация процессов проектирования открытых и подземных выработок, буровзрывных и закладочных работ, крепления, в целом отвалов и карьеров, рудников и шахт. Использование данных оперативного мониторинга, полученных с помощью средств высокоточного позиционирования, необходимо

для уточнения геологических моделей, фактического положения горных выработок, динамической корректировки параметров технологических процессов добычи ПИ.

Вкупе с цифровыми системами управления горным производством, MES и SCADA системами управления технологическими процессами обогащения производства это позволяет реализовать по-настоящему цельный геометаллургический подход как инструмент оптимизации производственных показателей на основе эффективного управления качеством полезных ископаемых при открытой и подземной добыче минерального сырья.

Необходимо отметить, что развитие функционально-го наполнения ГИС сталкивается с проблемами общей неразвитости отдельных направлений прикладного математического аппарата и соответствующей отсталости в алгоритмической базе и программных продуктах в нашей стране.

Так, отсутствуют системные исследования, направленные как на развитие теории геостатистики, так и на реализацию ее методов в геологии твердых полезных ископаемых. В отечественной геологической практике геостатистические методы начали применяться с середины восьмидесятых годов, тогда была выпущена программа Geostatistical Software Tool, автором которой являлся В.А. Мальцев<sup>2</sup>. Вышло несколько версий данного программного обеспечения (ПО), в котором моделирование основано на визуальном интерактивном управлении его параметрами. Последняя версия программы являлась трехмерной ГИС-системой, ориентированной на задачи геостатистического моделирования и взаимодействие с другими программами, что обеспечивало полный цикл моделирования месторождения. Однако со смертью автора – талантливого геолога и спелеолога в 2014 г., развитие программы остановилось.

Для моделирования объектов геологической среды – рудных тел, пластов и пр. необходимо использовать методы стратиграфического и неявного моделирования, которые существенно облегчают труд геологов, позволяют корректно моделировать некоторые типы месторождений, которые адекватно моделировать старыми методами практически невозможно или очень трудоемко. Используемый математический аппарат решения граничных задач основан на интерполяции методом радиальных базисных функций (РБФ)<sup>3</sup> [7]. Собственно, теория РБФ известна давно и нашла применение в геоинформационных технологиях, однако отечественный специализированный программный продукт для геологического моделирования на этой основе еще предстоит создать.

Планирование горных работ связано с решением оптимизационных задач, позволяющих определять рациональное направление развития горных работ, решать проблемы усреднения качества потока добываемого полезного ископаемого, оптимизировать распределение горного оборудования, составлять графики работы персонала, решать транспортные задачи и много другое. История решения оптимизационных задач имеет более чем 80-летнюю историю, однако до сих пор нет отечественных коммерчески успешных решений для горной промышленности. Запад-

<sup>2</sup> Geostatistical SoftwareTool. Режим доступа: <http://geo.web.ru/maltsev/gst.html>

<sup>3</sup> Оценка содержания полезного компонента с применением радиальных базисных функций (РБФ) в сравнении с традиционными геостатистическими методами оценки. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ocenka-soderzhaniya-poleznogo-komponenta-s-ispolzovaniem-rbf.pdf?ysclid=ikb63iim6160169761>

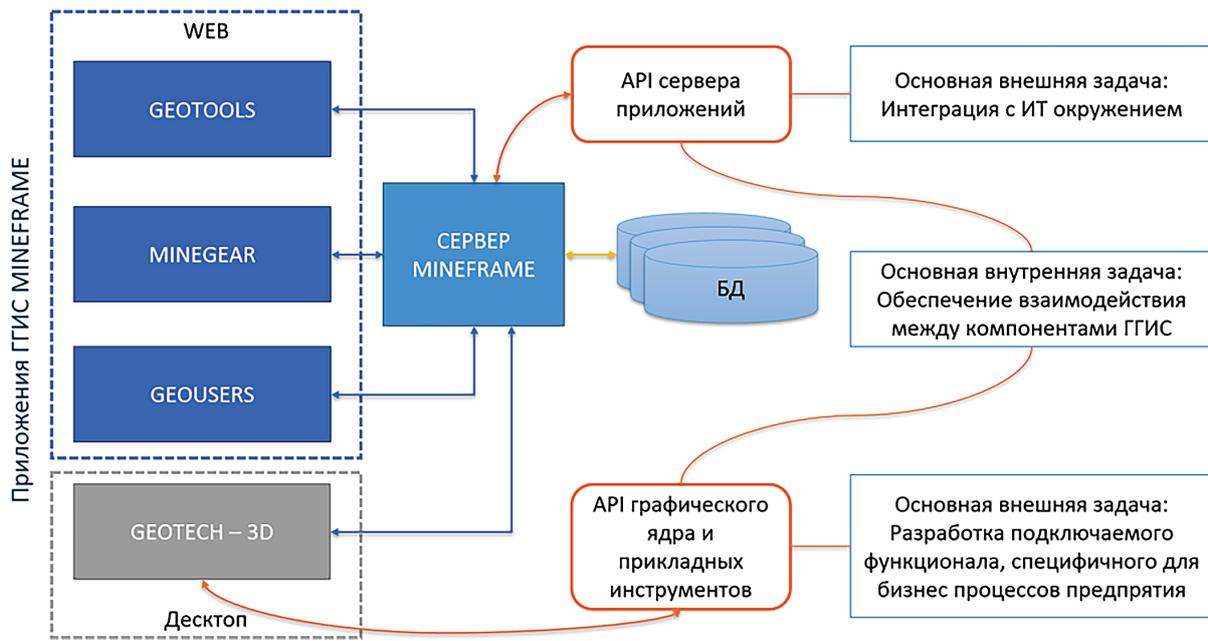


Рис. 2  
Укрупненная схема целевой архитектуры цифровой платформы ГГИС MINEFRAME (в правом нижнем квадрате – бизнес-процессы предприятия)

Fig. 2  
A simplified diagram of the target architecture of the MINEFRAME digital mining and geological information system

ные ограничения коснулись и этой сферы – до недавнего времени подобные задачи решались с помощью проприетарного зарубежного ПО (IBM CPLEX, Gurobi, FICO и пр.)<sup>4</sup>. Бесплатные решатели с открытым исходным кодом тоже существуют, но они заметно уступают коммерческим в производительности, а для решения многокритериальных задач в больших размерностях время расчета является критически важным. Разработчики ГГИС MINEFRAME при решении задач долгосрочного планирования горных работ используют методы смешанно-целочисленного линейного программирования (*Mixed Integer Linear Programming*) и методы программирования в ограничениях (*Constraint Programming*), работающих с высокой размерностью пространства поиска. Используемые алгоритмы интегрируют процедуры логического вывода для ограничений на заданную производственную мощность, а также ограничений на шаблоны извлечения блоков трехмерной блочной модели месторождения. Производится исключение недопустимых значений из областей определения переменных с анализом шаблонов последовательности выемки блоков и учетом дополнительных требований на допустимое количество уровней извлекаемых блоков за один период разработки карьера.

Перспективами развития ГГИС, помимо расширения функционала, является и использование технологий искусственного интеллекта (ИИ) как традиционного, так и генеративного. Традиционный ИИ ориентирован на интеллектуальное выполнение конкретных задач. Он относится к системам, которые предназначены для обучения на определенном наборе входных данных и позволяют принимать решения или прогнозы на их основе [8; 9].

В отличие от традиционного, генеративный ИИ создает что-то новое на основе данных, которые ему предоставили. Сейчас это тексты, статичные и видеозаписи, музыка, компьютерный код. Модели генеративного ИИ обучаются на наборе данных и на основе выявленных закономерностей генерируют новые данные, комбинирующие и модифицирующие данные исходного набора. Важной особенностью применения генеративных методов ИИ в проектировании и планировании горных работ будет использование методов оптимизации с учетом большого количества природных и технологических параметров и ограничений. В большинстве алгоритмов машинного обучения цель состоит в построении модели оптимизации, которая изучает влияние этих параметров на целевую функцию, которая, как правило, представляет собой NPV. Машинное обучение сможет решать по-настоящему задачи больших размерностей благодаря способности обрабатывать совокупности влияющих параметров на гораздо более детальном уровне и по-настоящему продвинет концепцию оптимального проектирования как с точки зрения экономической эффективности, так и промышленной безопасности.

Еще одно направление развитие ГГИС MINEFRAME – это создание цифровой платформы (ЦП), обеспечивающей через открытые интерфейсы передачи данных доступ к функционалу платформы с возможностью интеграции в неё цифровых инструментов, разрабатываемых сторонними разработчиками (рис. 2). Это могут быть функции, решающие задачи специфические для конкретных горнодобывающих предприятий, интеграции с существующими цифровыми решениями, преобразованием и конвертацией данных, расширения возможностей и тонкой настройки имеющихся инструментов, автоматизации выполнения

<sup>4</sup> Воронин С. Импортозамещение солверов: как оптимизировать логистику, HR и производство после ухода с рынка иностранных гигантов. Режим доступа: <https://rb.ru/opinion/import-substitution-solvers/?ysclid=ij10xcq1j623380288>

рутинных задач. Использование ЦП позволит упростить процесс формирования единого информационного пространства горного предприятия, создания цифровой системы управления горнодобывающего предприятия. В рамках создания ЦП планируется обеспечить также и кроссплатформенность решения.

С учётом активного перехода горнодобывающих предприятий на цифровые технологии инженерного обеспечения горных работ и управления технологическими процессами наличие отечественной ГГИС с функциями цифровой платформы обеспечит технологический суверенитет в этом ключевом классе программных продуктов.

В разной степени в таком продукте заинтересованы горнодобывающие предприятия с различными масштабами бизнеса:

1. Крупные сырьевые холдинги, включающие десятки шахт и карьеров, перерабатывающие мощности, логистическую инфраструктуру;
2. Игроки регионального или отраслевого уровня, небольшие угольные разрезы и шахты, открытые и подземные рудники с производительностью до нескольких млн т;
3. Мелкие предприятия, как правило, ведущие добычу ПИ открытым способом, – карьеры по добыче строительных материалов, прииски.

Для предприятий первой группы требуются высококлассные решения, обеспечивающие совместную работу большого коллектива инженерного состава, крайне важным являются вопросы кастомизации предлагаемого функционала и интеграции с уже сложившимся ИТ ландшафтом и обеспечения информационной безопасности. Предприятия второй группы имеют ограниченные ресурсы для адаптации стандартного функционала, поэтому в основном удовлетворяются стандартными решениями, отработанными на предприятиях первой группы. Предприятия третьей группы, как правило, ограничиваются стандартным набором функций сродни коробочному решению.

В результате реализации цифровой платформы предприятия всех трёх групп получают продукт, адаптируемый под их потребности. При этом наибольший эффект получают предприятия первой группы, некоторые из которых уже попали по санкционные ограничения и ведут поиск отечественных решений.

## Заключение

Цифровизация современного горнодобывающего производства – это неумолимая тенденция, которая затрагивает комплекс сложных цепочек создания стоимости, технологических процессов и логистических схем, коммерцию и критическую инфраструктуру – от разведки месторождения, через проектирование к добыче и переработке сырья до создания конечного продукта и доставки его потребителю.

Надежное функционирование горнодобывающего предприятия как одного из важнейших звеньев этой цепочки в значительной степени зависит от всестороннего понимания текущего состояния его сложной природно-технической системы. ГГИС позволяют иметь надежные знания о месторождении на каждой из стадий разведки, проектирования и эксплуатации путем использования трехмерных геологических и геомеханических моделей, определения закономерностей распределения содержания полезных и вредных компонентов ПИ для всестороннего анализа сценариев последовательности разработки месторождения, выбора наиболее эффективных технологий и оборудования, оценки уровня риска проектных решений и их экономической эффективности.

Этот подход полностью соответствует направлениям цифровой трансформации, задекларированным правительством РФ<sup>5</sup>, и представляет собой новый этап автоматизации и информатизации экономической деятельности и государственного управления, процесс перехода на цифровые технологии<sup>6</sup>, в основе которого лежит не только использование для решения задач производства или управления информационно-коммуникационными технологиями, но также накопление и анализ с их помощью больших данных в целях прогнозирования ситуации, оптимизации процессов и затрат, привлечения новых контрагентов и т.д.

<sup>5</sup> Методические рекомендации по цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием. Режим доступа: [https://digital.gov.ru/ru/documents/7342/?utm\\_referer=https%3a%2f%2fyandex.ru%2f](https://digital.gov.ru/ru/documents/7342/?utm_referer=https%3a%2f%2fyandex.ru%2f)

<sup>6</sup> Первая редакция СТБ «Цифровая трансформация. Термины и определения». Режим доступа: <https://stb.by/Stb/ProjectFileDownload.php?UrlId=9032>

## Список литературы

1. Barnewold L. Digital technology trends and their implementation in the mining industry. In: Mueller C., Assibey-Bonsu W., Baafi E., Dauber C., Doran C., Jaszczuk M., Nagovitsyn O. (eds) *Mining goes Digital: Proceedings of the 39<sup>th</sup> International Symposium "Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry" (APCOM 2019), June 4–6, 2019, Wroclaw, Poland*. CRC Press; 2019, pp. 9–16. <https://doi.org/10.1201/9780429320774-2>
2. Лукичев С.В. Развитие отечественного программного обеспечения – это не только решение задачи импортозамещения, но и обеспечения технологической независимости страны. *Горная промышленность*. 2022;(2):12–14.
3. Капутин Ю.Е. *Информационные технологии и экономическая оценка горных проектов (для горных инженеров)*. СПб.: Недра; 2008. 396 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/7023>
4. Лукичев С.В. (ред.) *Научные и практические аспекты применения цифровых технологий в горной промышленности*. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук; 2019. 192 с.
5. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности: прошлое, настоящее, будущее. *Горный журнал*. 2020;(9):13–18. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.01>
6. Лукичев С.В., Наговицын О.В., Ильин Е.А., Рудин П.С. Цифровые технологии инженерного обеспечения горных работ – первый шаг к созданию «умного» добычного производства. *Горный журнал*. 2018;(7):86–90. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.17>
7. Косников Ю.Н. Особенности применения радиальных базисных функций в геометрическом моделировании трехмер-

- ных объектов визуализации. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2020;(4):55–70. <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2020-4-6>
8. Huang L., Balamurali M., Silversides K. L. Machine learning classification of geochemical and geophysical data. In: Mueller C., Assibey-Bonsu W., Baafi E., Dauber C., Doran C., Jaszczuk M., Nagovitsyn O. (eds) *Mining goes Digital: Proceedings of the 39<sup>th</sup> International Symposium “Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry” (APCOM 2019), June 4–6, 2019, Wroclaw, Poland*. CRC Press; 2019, pp. 101–105. <https://doi.org/10.1201/9780429320774-12>
9. Avalos S., Ortiz J.M. Recursive convolutional neural networks in a multiple-point statistics framework. In: Mueller C., Assibey-Bonsu W., Baafi E., Dauber C., Doran C., Jaszczuk M., Nagovitsyn O. (eds) *Mining goes Digital: Proceedings of the 39<sup>th</sup> International Symposium “Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry” (APCOM 2019), June 4–6, 2019, Wroclaw, Poland*. CRC Press; 2019, pp. 168–176. <https://doi.org/10.1201/9780429320774-19>

## References

1. Barnewold L. Digital technology trends and their implementation in the mining industry. In: Mueller C., Assibey-Bonsu W., Baafi E., Dauber C., Doran C., Jaszczuk M., Nagovitsyn O. (eds) *Mining goes Digital: Proceedings of the 39<sup>th</sup> International Symposium “Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry” (APCOM 2019), June 4–6, 2019, Wroclaw, Poland*. CRC Press; 2019, pp. 9–16. <https://doi.org/10.1201/9780429320774-2>
2. Lukichev S.V. Development of the Russian software is not only a solution to the import substitution challenge, but also a way to ensure the country's technological independence. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):12–14. (In Russ.)
3. Kaputin Yu.E. *Information technologies and economic assessment of mining projects (for mining engineers)*. St. Petersburg: Nedra; 2008. 396 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/7023>
4. Lukichev S.V. (ed.) *Scientific and practical aspects of applying digital technologies in the mining industry*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2019. 192 p. (In Russ.)
5. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. Digital transformation of mining industry: Past, Present and Future. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):13–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.01>
6. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., Ilin E.A., Rudin R.S. Digital technologies for sustainable engineering in mining – The first step towards a “smart mine”. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(7):86–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.17>
7. Kosnikov Yu.N. Radial basis functions use in geometric modeling of three-dimensional objects of visualization. *Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society*. 2020;(4):55–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.21685/2227-8486-2020-4-6>
8. Huang L., Balamurali M., Silversides K. L. Machine learning classification of geochemical and geophysical data. In: Mueller C., Assibey-Bonsu W., Baafi E., Dauber C., Doran C., Jaszczuk M., Nagovitsyn O. (eds) *Mining goes Digital: Proceedings of the 39<sup>th</sup> International Symposium “Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry” (APCOM 2019), June 4–6, 2019, Wroclaw, Poland*. CRC Press; 2019, pp. 101–105. <https://doi.org/10.1201/9780429320774-12>
9. Avalos S., Ortiz J.M. Recursive convolutional neural networks in a multiple-point statistics framework. In: Mueller C., Assibey-Bonsu W., Baafi E., Dauber C., Doran C., Jaszczuk M., Nagovitsyn O. (eds) *Mining goes Digital: Proceedings of the 39<sup>th</sup> International Symposium “Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry” (APCOM 2019), June 4–6, 2019, Wroclaw, Poland*. CRC Press; 2019, pp. 168–176. <https://doi.org/10.1201/9780429320774-19>

### Информация об авторе

**Наговицын Олег Владимирович** – доктор технических наук, заместитель директора института по научной работе, заведующий лабораторией теории комплексного освоения и сохранения недр, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: o.nagovitsyn@ksc.ru

### Information about the author

**Oleg V. Nagovitsyn** – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Research, Head of Laboratory of Integrated Subsoil Development and Conservation Theory, Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: o.nagovitsyn@ksc.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.10.2023  
Поступила после рецензирования: 22.11.2023  
Принята к публикации: 28.11.2023

### Article info

Received: 09.10.2023  
Revised: 22.11.2023  
Accepted: 28.11.2023