Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-272-278

Системы среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ: единая методика и опыт импортозамещения в компании «АЛРОСА»

В.В. Лаптев[1]✉, Е.Д. Зикрацкая[2]
[1] Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
[2] АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация
✉ v-laptev@ksc.ru

Резюме: Статья посвящена разработке и промышленной апробации комплексного подхода к среднесрочному планированию открытых и подземных горных работ в горно-геологической информационной системе «Майнфрэйм». На среднесрочном горизонте предприятие должно одновременно учитывать множество факторов: положение фронта работ, запасы и качество полезного ископаемого, производительность оборудования, транспортную схему, технологические связи, календарные ограничения, требования к объёмам добычи. При ручной подготовке среднесрочного плана эти данные часто собираются из разных источников, что усложняет проверку альтернативных сценариев и приводит к необходимости оперативного перепланирования. В статье представлен единый методический подход, основанный на объектном представлении элементов горной технологии, комплексном учёте исходных данных и итерационном цикле «исходные данные – целевые показатели – расчёт – анализ – корректировка – перепланирование». Расчётная процедура включает оптимизацию последовательности вовлечения объектов и имитационное моделирование развития горных работ. Требования к системе формировались исходя из практики централизованного планирования и необходимости быстро оценивать альтернативные варианты при изменении производственных условий. Практическая ценность подхода определяется: 1) автоматизацией расчёта, 2) сокращением ручной подготовки данных, 3) повышением прозрачности предпосылок плана, 4) возможностью быстрее оценивать последствия производственных изменений.

Ключевые слова: среднесрочное планирование горных работ, открытые горные работы, подземные горные работы, горно-геологическая информационная система, комплексный учет данных, сценарное планирование, имитационное моделирование, оптимизация последовательности работ, единая цифровая модель, промышленная апробация

Благодарности: Авторы выражают благодарность специалистам Управления планирования производства АК «АЛРОСА» (ПАО), участвовавшим в работе над проектом, а также команде разработки ООО «Лаборатория Майнфрэйм», преобразовавшей методики и требования в программное решение.

Для цитирования: Лаптев В.В., Зикрацкая Е.Д. Системы среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ: единая методика и опыт импортозамещения в компании «АЛРОСА». *Горная промышленность*. 2026;(5):272–278. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-272-278

Medium-term planning systems for open-pit and underground mining operations: a unified methodology and import substitution experience at ALROSA

V.V. Laptev[1] ✉, E.D. Zikratskaya[2]
[1] Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
[2] ALROSA PJSC, Mirny, Russian Federation
✉ v-laptev@ksc.ru

Abstract: The article presents the development and industrial testing of medium-term planning systems for open-pit and underground mining operations implemented in Mineframe. The relevance of such systems is determined by the need to simultaneously account for the position of the mining front, mineral reserves and grades, equipment capacity, haulage schemes, technological dependencies, calendar constraints, and production targets within a medium-term planning time-frame. In manual planning workflows, these data are often collected from multiple sources, which makes it difficult to compare alternative scenarios and perform timely replanning when production conditions change. A unified methodological approach is proposed

based on an object-oriented representation of the mining method elements, integrated use of the input data, and an iterative planning cycle: input data – target indicators – calculation – analysis – adjustment – replanning. The computational procedure combines optimization of the sequence in which the mining objects are brought into operation with simulation modelling of the mining progress. The system requirements were formulated in cooperation with specialists from the Production Planning Department of ALROSA, taking into account the practical experience of centralized planning and the need for rapid assessment of "what-if" scenarios under changing production conditions. The results show that the practical value of the proposed approach is not limited to automating calculations. It also reduces manual data preparation, improves the transparency of planning assumptions, and provides a basis for faster assessment of the consequences of production changes.

Keywords: medium-term mine planning, surface mining, underground mining, mining and geological information system, integrated data accounting, scenario planning, discrete-event simulation, production sequence optimization, unified digital model, industrial validation

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the specialists from the Production Planning Department of ALROSA who participated in the project, as well as to the development team at Mineframe Laboratory, who translated the methods and requirements into a software solution.

For citation: Laptev V.V., Zikratskaya E.D. Medium-term planning systems for open-pit and underground mining operations: a unified methodology and import substitution experience at ALROSA. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):272–278. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-272-278

Введение

Цифровая трансформация горнодобывающих предприятий постепенно смещается от автоматизации отдельных операций к формированию единых цифровых контуров управления горным производством, в которых инженерные модели используются не только для отдельных процессов, но и для комплексного обоснования производственных решений [1; 2]. В российских условиях к этому добавляется задача технологической независимости: замещение зарубежного программного обеспечения должно обеспечивать не формальное воспроизведение интерфейсов и функций, а сохранение и дальнейшее развитие критически важных производственных процессов [3].

Среднесрочное планирование занимает ключевое положение между стратегическими проектными решениями и оперативным управлением. На данном горизонте требуется согласовать положение и состояние фронта работ, запасы и качество полезного ископаемого, последовательность подготовки и отработки объектов, ограничения транспортной сети и производительности оборудования, графики работы и целевые показатели. На практике эти сведения формируются разными службами: геологической, маркшейдерской, технологической, экономической, ремонтной и службой планирования производства. Отдельно учитываются требования обогатительной фабрики к качеству поступающего сырья. Из-за длительного сбора и согласования к моменту завершения подготовки часть исходных предпосылок уже может измениться. Это приводит к повторной актуализации данных, корректировке плана развития горных работ и потере времени на подготовку управленческого решения.

Поэтому практический интерес предприятия к цифровому планированию определяется не только возможностью автоматизировать отдельный расчёт. Более существенна способность системы связать исходные данные, рассчитать план развития горных работ, быстро уточнить его при изменении условий и сформировать сопоставимые альтернативные варианты.

Отечественные исследования показывают целесообразность интеграции планирования с горно-геологическими информационными системами, объектными моделями горной технологии, расчетами транспортирования и учетом технологических ограничений [4–6]. В мировой практике развиваются методы оптимизации последовательности работ, имитационного моделирования, интеграции производственного расписания и транспортных решений, а также оценки устойчивости планов в условиях неопределенности [7–14]. Однако перенос математических методов в повседневную практику предприятия по-прежнему осложняется неоднородностью данных, различием технологий и корпоративных методик, а также необходимостью получения объяснимого результата.

Цель исследования – разработать и апробировать комплексный методический подход к среднесрочному планированию открытых и подземных горных работ на общей объектной и алгоритмической основе, непосредственно связанной с цифровой моделью предприятия. Научная задача заключается в формализации единого контура данных, объектов, ограничений и расчётных процедур для двух существенно различающихся способов разработки. Практическая задача состоит в обеспечении воспроизводимого процесса формирования, проверки и корректировки сценариев, пригодного для адаптации к условиям конкретного предприятия.

Материалы и методы

Исходные требования и организация работ

Исследование выполнялось на основе научно-методических подходов Горного института Кольского научного центра РАН в рамках совместной разработки инструментов среднесрочного планирования на базе горно-геологической информационной системы (ГГИС) «Майнфрэйм» с Управлением планирования производства (УПП) АК «АЛРОСА» (ПАО).

Исходной организационной предпосылкой стала централизация планирования горных работ в компании и необходимость оперативного реагирования на меняющиеся рыночные и производственные условия. После ограничения доступа к ранее применявшимся зарубежным решениям задача получила также выраженный импортозамещающий характер. Требования формировались итерационно и исходили из практики работы УПП АЛРОСА. Заказчиком были описаны не только требуемые функции, но и логика использования прежних решений: планирова-

Таблица 1
Исходные данные комплексного расчетного контура планирования

Table 1
Input data for the integrated planning calculation scheme

Категория данных	Что учитывается	Роль в расчете	Практическое значение
Геологические (каркасные и блочные модели)	Количество и качество запасов, сортность полезного ископаемого, физико-механические характеристики массива горных пород	Расчёт объёмов и качества горных пород в отрабатываемых объектах, учёт характеристик горной массы	Повышение точности прогноза объёмно-качественных показателей добычи, расчёт производительности оборудования и продолжительности операций на основе характеристик горной массы в каждом забое
Маркшейдерские (каркасные модели, атрибутивная информация)	Фактическое положение горных работ, текущее состояние объектов	Определение доступного фронта горных работ и условий для их начала	Согласование плана с фактическим состоянием работ, упрощение подготовки плана развития горных работ
Проектные (каркасные модели, атрибутивная информация)	Направления развития, проектные объекты	Объёмы добычи, метраж проходки, разделение объёмов и метража по видам работ	Учёт направлений, увязка среднесрочного сценария с проектными решениями
Технологические	Графики работ, требования к последовательности подготовки и отработки объектов, вариативность операций и циклов работ	Формирование технологически допустимой последовательности работ, проверка возможности начала операций и учёт взаимосвязей между объектами	Снижение риска формирования формально достижимого, но технологически невыполнимого сценария; повышение прозрачности причин задержек и ограничений при перепланировании, повышение точности планирования
Оборудование и производительность	Состав оборудования, закрепление техники, производительность в конкретных условиях, простои, ремонты и фактическая занятость техники	Расчёт длительности операций, проверка загрузки оборудования, выявление дефицита производительности и конфликтов по ресурсам	Более обоснованная оценка достижимости производственных целей, выявление узких мест по технике и поддержка решений о перераспределении оборудования
Транспортные	Транспортная сеть, пункты погрузки и разгрузки, ограничения скорости и движения по участкам, характеристики дорог	Расчёт плеч доставки для каждого забоя, времени перемещения, производительности транспортирования и влияния маршрутов на выполнение плана	Согласование плана с фактической транспортной доступностью объектов, выявление ограничений по маршрутам и снижение риска недооценки времени транспортирования
Календарные и ресурсные	Периоды планирования, графики работ, календарь массовых взрывов, доступность персонала, оборудования, объектов и технологических ресурсов	Распределение работ по периодам, проверка доступности ресурсов и соблюдение календарных ограничений при формировании сценария	Повышение реализуемости плана во времени, снижение числа конфликтов между работами и возможность оперативной корректировки при изменении доступности ресурсов
Целевые показатели	Плановые объёмы добычи и проходки, требования к качеству, рудопотоку, срокам и приоритетам выполнения работ	Задание критериев формирования сценария, проверка выполнения плановых показателей и сравнение альтернативных вариантов	Переход от ручного подбора варианта к управляемой проверке достижимости целей; возможность быстро оценить последствия изменения объёмов, качества или приоритетов

ние от натурально-объёмных показателей «снизу вверх», опора на фактические показатели работы рудников, учёт производительности, готовности техники, ограничений по участкам и необходимость быстро оценивать варианты развития горных работ по принципу «что будет, если?». К основным требованиям были отнесены: работа с актуальным положением горных работ; учёт взаимосвязанных технологических и ресурсных ограничений; возможность задания жёстких и автоматически формируемых правил; расчёт транспортных маршрутов и производительности; создание, дублирование и сравнение сценариев.

Важной особенностью организации работ стало непосредственное участие в процессе специалистов УПП. Были сформированы рабочие группы по направлениям открытых и подземных горных работ, которые проверяли создаваемые версии методик, алгоритмов и программных решений на реальных данных.

Комплексный информационный контур

Чтобы связать контур планирования с цифровой моделью предприятия, архитектура решения предусматривает основной сценарий, при котором исходные горно-геологи-



Рис. 1
Итерационный цикл формирования и корректировки сценария среднесрочного плана

Fig. 1
Iterative cycle of generating and adjusting medium-term plan scenario

ческие и производственные данные формируются в ГГИС «Майнфрэйм» и сохраняются в единой базе данных, к которой обращаются модули планирования. Альтернативным вариантом является импорт данных из сторонних систем, их структурирование и дальнейшее использование в расчётном контуре.

В расчетном контуре используются каркасные и блочные модели, фактическое и проектное положение горных работ, целевые объемы и показатели качества, параметры оборудования, методики расчета производительности, транспортная сеть, ограничения скорости и движения по участкам, календарь массовых взрывов, пункты погрузки и разгрузки, связки экскаваторов и автосамосвалов, технологические связи и доступность ресурсов (табл. 1). Принципиальным является не механическое накопление максимально возможного объема сведений, а установление связей между данными, влияющими на достижимость и производственную реализуемость плана. Такой подход позволяет рассматривать исходные данные как общую производственную основу, а не как набор разрозненных входных файлов, что создает методическую основу для сокращения повторной подготовки данных.

Объектная модель открытых и подземных горных работ

Описанный комплексный подход сам по себе не превращает исходные данные в план. Для расчёта они должны быть связаны с конкретными объектами горных работ, их состоянием, доступностью, технологическими зависимостями и допустимыми операциями. Поэтому следующим методическим шагом стало преобразование исходных данных в объектную модель, пригодную для проверки последовательности работ, оценки ограничений и последующего перепланирования.

В основе методики лежит представление элементов горной технологии (блоков, выработок, выемочных единиц) как типовых объектов планирования. Каждый объект характеризуется геометрией, пространственным положением, набором атрибутов, состоянием, доступностью, технологическими связями и допустимыми операциями. Для открытых горных работ объектами могут быть участки, уступы, блоки, направления развития, склады и отвалы; для подземных – выработки, камеры, панели, блоки и другие выемочные единицы.

Общая объектная основа не означает нивелирования различий открытых и подземных горных работ. Технологическая специфика формализуется на уровне правил отработки, последовательности операций, пространственных, календарных и ресурсных ограничений. Благодаря этому общими остаются структура данных, сценарный цикл и принципы проверки результата, тогда как расчётные правила адаптируются к конкретной технологии.

Итерационный цикл и расчетная процедура

После формализации объектов необходимо определить порядок перехода от исходных данных к управленчески полезному результату. Для службы планирования таким результатом является не только первый рассчитанный вариант, но и возможность понять причины полученных результатов, изменить предпосылки и быстро получить сопоставимый сценарий.

Методика представлена как итерационный цикл (рис. 1), в котором получение первого варианта плана не является конечной целью. После выбора активного контура задаются целевые показатели и ограничения, рассчитывается сценарий, анализируются результаты и причины отклонений. При изменении исходных условий выполняется

повторный расчёт на общей объектной и информационной основе. Тем самым перепланирование рассматривается как штатная операция, а не как повторная подготовка плана с нуля.

Расчёт выполняется в два этапа. На первом этапе оптимизационные алгоритмы [15; 16] формируют последовательность вовлечения объектов в работу с учётом целевых показателей, усреднённых ограничений, производительности и загрузки оборудования. На втором этапе последовательность проверяется средствами имитационного моделирования с более детальным учётом технологических операций, плеч доставки и характеристик дорог, календарной доступности и связей между объектами. При выявлении недостижимости цели или конфликтов исходные параметры уточняются, после чего цикл повторяется.

Результаты

Сформированный функциональный контур

В результате совместной работы специалистов Горного института Кольского научного центра РАН, экспертов УПП АЛРОСА и разработчиков – ООО «Лаборатория Майнфрэйм», был сформирован единый методический контур и на его основе разработаны продукты среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ в системе «Майнфрэйм». Результаты апробации АК «АЛРОСА» свидетельствуют о работоспособности решений для задач планирования открытых работ с углубочной системой разработки и подземных работ с камерной системой с закладкой, нисходящей слоевой отработкой с закладкой, системой с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. Полученный результат имеет двойной эффект: с одной стороны, решена прикладная задача импортозамещения систем среднесрочного планирования; с другой – создана унифицированная методическая и программная основа, пригодная для дальнейшей адаптации под другие системы разработки и различные горно-геологические условия.

Реализованный инструментарий автоматизирует выбор объектов планирования, расчет вариантов транспортирования и расстояний, определение производительности оборудования в конкретных условиях, учет последовательности технологических операций, распределение ресурсов по периодам и проверку выполнения целевых показателей. Степень детализации модели может изменяться: укрупненный расчет применяется для быстрого анализа вариантов, детализированный – для проверки дополнительных условий и узких мест.

Интеграция с горно-геологической информационной системой позволяет использовать актуальные инженерные данные без их постоянного повторного сбора и подготовки специально для планирования. При необходимости данные могут быть внесены путём импорта проектного и фактического положения горных работ, справочников и геологических моделей. В этом случае импорт рассматривается как точка входа, а не как регулярная схема обмена: основная ценность достигается при дальнейшем сопровождении объектов и сценариев в связанной информационной среде.

Для подразделений, выполняющих планирование горных работ, это означает снижение объема повторных операций и повышение интерпретируемости результата; для производственного руководства – возможность быстрее оценивать достижимость целей и последствия изменения исходных условий и принимаемых решений; для корпоративной информационной среды – повторное использование актуальных инженерных данных без постоянной передачи файлов.

Результаты промышленной проверки

Промышленная проверка выполнялась совместно со специалистами АК «АЛРОСА». На полученных версиях продукта загружались реальные блочные и каркасные модели, производственные данные, после чего результаты расчетов сопоставлялись с фактической работой и плановыми сценариями. Один из контрольных расчетов был выполнен на данных фактической работы карьера за месяц. Сопоставление включало не только суммарные объемы, но и показатели производительности, простои экскаваторов и автосамосвалов, ремонтные простои, фактическую занятость техники, состав вовлекаемых объектов и общую логику развития горных работ.

Для указанного контрольного сценария отклонение автоматизированного расчета от фактических данных составило порядка 1,5%. При интерпретации этого результата принципиально важно учитывать качество исходных данных: актуальность блочной модели, корректность геологической разметки, полнота фактических данных и правильность внесения ограничений напрямую влияют на близость расчётного сценария к реальной производственной картине. Дополнительная апробация на данных других предприятий с открытыми и подземными горными работами показала, что перенос методики может потребовать предварительного анализа и адаптации структуры исходных данных, технологии планирования и состава ограничений. Поэтому применение целесообразно начинать с ограниченного контура, для которого заранее определены исходные данные, контрольные показатели и критерии успешности.

Обсуждение результатов

Полученные результаты согласуются с современным направлением развития систем планирования, в котором оптимизационные методы дополняются имитационной проверкой и сценарным анализом. Комплексный учёт исходных данных – технико-экономических показателей работы техники, ограничений транспортной сети и особенностей технологии ведения работ – позволяет избежать локальной оптимизации отдельных процессов в ущерб общим производственным показателям [12; 13].

Отличительной особенностью предложенного подхода является соединение формализованной расчетной постановки с повседневной работой службы планирования. Эффект возникает не за счет усложнения алгоритма как такового, а за счет совместной работы трех элементов: актуальных исходных данных, формализованных правил планирования и понятного пользователю механизма проверки результата. Если данные продолжают собираться вручную из несвязанных источников, правила остаются неформализованными, а результат невозможно объяснить, то автоматизация не дает устойчивого производственного эффекта. В единой объектной модели расчет связан с текущим состоянием работ, а причины формирования сценария становятся видимыми для специалиста и руководителя.

Комплексный учёт данных прежде всего влияет на точность и качество планирования горных работ. Геологиче-

ские сведения задают ресурсную и качественную основу, фактическое положение определяет доступный фронт, проектные решения фиксируют целевое состояние, параметры оборудования и транспорта задают темпы развития горных работ, а технологические и календарные связи определяют реализуемость последовательности. Исключение одной из этих категорий повышает риск формирования сценария, который выглядит оптимальным формально, но не может быть выполнен в производственных условиях.

На корпоративном уровне единая основа планирования открытых и подземных горных работ создаёт предпосылки для стандартизации принципов планирования между объектами и подразделениями без устранения технологической специфики. Это представляет интерес для компаний с несколькими производственными площадками: едиными могут быть структура данных, сценарный цикл, критерии проверки и требования к прозрачности, тогда как технологические правила настраиваются для каждого конкретного месторождения.

Перспективы дальнейшего развития связаны с расчетом стоимостной оценки сценариев, определением потребного парка оборудования, расширением набора поддерживаемых технологий, повышением скорости расчета и увязкой среднесрочного, краткосрочного и оперативного горизонтов планирования на основе единой объектной модели.

Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Разработан комплексный методический подход к среднесрочному планированию открытых и подземных горных работ, основанный на общей объектной модели и объединении геологических, маркшейдерских, проектных, технологических, транспортных и производственных данных.
2. Показано, что практическая ценность цифрового планирования определяется не только алгоритмом расчета, но и повторным использованием актуальных данных, прозрачностью ограничений и возможностью штатного перепланирования.
3. Предложен итерационный цикл формирования, анализа и корректировки сценария и реализована двухэтапная расчетная схема, сочетающая построение рациональной последовательности работ и имитационную проверку ее реализуемости.
4. Сформированы два продукта среднесрочного планирования открытых и подземных горных работ на общей методической основе при сохранении технологической специфики в правилах, операциях и ограничениях.
5. Проведенная проверка показала расхождение автоматизированных и ручных результатов в пределах 1–2% по сопоставляемым показателям производительности, простоев оборудования, фактической занятости техники, состава вовлекаемых объектов и общей логики развития горных работ.

Список литературы / References

1. Рыльникова М.В., Струков К.И., Радченко Д.Н., Есина Е.Н. Цифровая трансформация – условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем. *Горная промышленность.* 2021;(3):74–78. https://doi.org/10.30686/1609-91922021-3-74-78
   Rylnikova M.V., Strukov K.I., Radchenko D.N., Esina E.N. Digital transformation: a prerequisite and foundation for sustainable development of mining operations. *Russian Mining Industry.* 2021;(3):74–78. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-91922021-3-74-78
2. Дерябин С.А., Темкин И.О. Онтологическое моделирование и управление цифровой трансформацией архитектуры горно-добывающих предприятий. *Записки Горного института.* 2025;275:130–144. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16728 (дата обращения: 11.02.2026).
   Deryabin S.A., Temkin I.O. Ontological modeling and management of digital transformation of mining enterprises architecture. *Journal of Mining Institute.* 2025;275:130–144. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16728 (accessed: 11.02.2026).
3. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Научно-методические подходы при реализации проекта импортозамещения ГГИС в АК «АЛРОСА». *Записки Горного института.* 2025;275:155–166. Режим доступа: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16712 (дата обращения: 11.02.2026).
   Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. Scientific and methodological approaches in implementing the MGIS import substitution project at PJSC ALROSA. *Journal of Mining Institute.* 2025;275:155–166. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16712 (accessed: 11.02.2026).
4. Наговицын Г.О. Краткосрочное планирование открытых горных работ в горно-геологической информационной системе MINEFRAME. *Горная промышленность.* 2023;(5S):130–134. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-130-134
   Nagovitsyn G.O. Short-term planning of surface mining operations in the MINEFRAME mining and geological information system. *Russian Mining Industry.* 2023;(5S):130–134. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-130-134

5. Лаптев В.В., Звонарева С.В. Расчет параметров транспортирования горной массы при автоматизированном планировании подземных горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2022;(2):70–80. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_70
Laptev V.V., Zvonareva S.V. Rock haulage loop design in automated underground mine planning. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(2):70–80. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_70

6. Лаптев В.В., Гурин К.П. Учет технологических и горно-геологических ограничений при автоматизированном планировании подземных горных работ. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023;(3):159–166. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230316
Laptev V.V., Gurin K.P. Automated planning of underground mining operations with regard to geological and geotechnical constraints. *Journal of Mining Science*. 2023;59(3):490–496. https://doi.org/10.1134/S106273912303016X

7. Savolainen J., Rakhsha R., Durham R. Simulation-based decision-making system for optimal mine production plan selection. *Mineral Economics*. 2022;35(2):267–281. https://doi.org/10.1007/s13563-021-00297-w

8. Quelopana A., Órdenes J., Wilson R., Navarra A. Technology upgrade assessment for open-pit mines through mine plan optimization and discrete event simulation. *Minerals*. 2023;13(5):642. https://doi.org/10.3390/min13050642

9. Rahnema M., Amirmoeini B., Moradi Afrapoli A. Incorporating environmental impacts into short-term mine planning: a literature survey. *Mining*. 2023;3(1):163–175. https://doi.org/10.3390/mining3010010

10. Carelos Andrade L., Dimitrakopoulos R. Integrated stochastic underground mine planning with long-term stockpiling: method and impacts of using high-order sequential simulations. *Minerals*. 2024;14(2):123. https://doi.org/10.3390/min14020123

11. Eustace C., Hynard K. Application of simulation and optimization to support mine plan execution. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024;41(6):3789–3800. https://doi.org/10.1007/s42461-024-01118-8

12. Xu C., Chen G., Lu H., Zhang Q., Liu Z., Bian J. Integrated optimization of production scheduling and haulage route planning in open-pit mines. *Mathematics*. 2024;12(13):2070. https://doi.org/10.3390/math12132070

13. Anvari K., Benndorf J. Real time mining – A review of developments within the last decade. *Mining*. 2025;5(3):38. https://doi.org/10.3390/mining5030038

14. Xie J., Ge F., Cui T., Wang X. A A virtual test and evaluation method for fully mechanized mining production system with different smart levels. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022;9(1):41. https://doi.org/10.1007/s40789-022-00510-3

15. Зуенко А.А., Олейник Ю.А. Составление расписаний как задача удовлетворения ограничений (на примере планирования открытых горных работ). *Информатика и автоматизация*. 2024;23(5):1290–1310. https://doi.org/10.15622/ia.23.5.1
Zuenko A.A., Oleynik Yu.A. Scheduling as a constraint satisfaction problem (using the example of open-pit mine production scheduling problem). *Informatics and Automation*. 2024;23(5):1290–1310. (In Russ.) https://doi.org/10.15622/ia.23.5.1

16. Oleynik Yu.A., Zuenko A.A. Open pit mine production scheduling using new global constraint. In: *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, November 11–13, 2022*. IEEE; 2022, pp. 1700–1704. https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016915

Информация об авторах
Лаптев Владимир Викторович – кандидат технических наук, руководитель лаборатории цифровых технологий горного производства, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0002-1525-1211; e-mail: v-laptev@ksc.ru
Зикрацкая Елизавета Данииловна – главный эксперт Управления планирования производства, АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация; e-mail: MironovaED@alrosa.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 08.06.2026
Поступила после рецензирования: 21.07.2026
Принята к публикации: 24.07.2026

Information about the authors
Vladimir V. Laptev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Digital Technologies in Mining, Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-1525-1211; e-mail: v-laptev@ksc.ru
Elizaveta D. Zikratskaya – Principal Expert, Production Planning Department, ALROSA PJSC, Mirny, Russian Federation; e-mail: mironovaed@alrosa.ru

Article info
Received: 08.06.2026
Revised: 21.07.2026
Accepted: 24.07.2026