ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Научно-методические подходы при реализации проекта импортозамещения ГГИС в АК «АЛРОСА»

С.В.Лукичев[1]✉, **О.В.Наговицын**[1,2]
[1] *Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*
[2] *ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ», Апатиты, Россия*

Как цитировать эту статью: Лукичев С.В., Наговицын О.В. Научно-методические подходы при реализации проекта импортозамещения ГГИС в АК «АЛРОСА» // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 155-166. EDN OSNSJE

Аннотация
Рассмотрен опыт стратегического сотрудничества разработчика горного программного обеспечения (ПО) и крупной горно-добывающей компании по адаптации горно-геологической информационной системы (ГГИС) к корпоративным требованиям компании. В связи с уходом из России зарубежных ГГИС в особенно сложной ситуации оказались крупные компании, которые долгие годы строили решения на основе импортных программных продуктов. Решение задачи импортозамещения ПО в горно-добывающей отрасли, имеющей дело со сложными природно-техническими системами, должно рассматриваться как управляемый междисциплинарный научно-инженерный процесс, требующий системного методологического подхода. Отмечена важность оценки уровня цифровизации существующих бизнес-процессов инженерного обеспечения горных работ при формировании рационального плана адаптации и доработки ПО. В связи с требованием быстрого решения проблемы импортозамещения отмечена необходимость учета внутреннего развития ГГИС при согласовании с индустриальным партнером плана работ по доработке функционала, что обеспечивает создание конкурентоспособной цифровой системы инженерного обеспечения горных работ не только для компании, но и всей горно-добывающей отрасли. Приведены основные направления доработки функционала ГГИС в области геологии, маркшейдерии и геотехнологии, а также примеры разработанных цифровых инструментов. Отмечено, что задачи развития ГГИС для требований АК «АЛРОСА» сегодня в основном решены и первоочередным стало создание программных средств среднесрочного и краткосрочного планирования открытых и подземных горных работ. Приведена функциональная схема модуля планирования. Для развития ГГИС рассмотрено создание горно-геологической цифровой платформы (ГГЦП), обеспечивающей возможность создания рабочих инструментов (модулей) путем использования API-функций и динамического присоединения модулей к системному ядру ГГЦП.

Ключевые слова
геология; маркшейдерия; геотехнология; горно-геологическая информационная система; планирование; программное обеспечение; цифровая платформа; моделирование

Поступила: 01.04.2025 ***Принята: 18.09.2025*** ***Онлайн: 31.10.2025*** ***Опубликована: 31.10.2025***

Введение

Как уже отмечалось многими экспертами, введение санкций сыграло двоякую роль [1, 2]. С одной стороны, санкции ограничили доступ к западным технологиям, показав серьезную зависимость отечественной горно-добывающей отрасли от импорта. С другой стороны, стимулировали разработку российских высокотехнологичных продуктов, которые долгие годы не могли на равных конкурировать с импортными аналогами в связи с отсутствием инвестиций в развитие. Показательна ситуация на отечественном рынке горно-геологических информационных систем (ГГИС), где наблюдается доминирование зарубежных разработок [3]. В особенно сложной ситуации оказались крупные компании, которые, являясь драйверами внедрения цифровых технологий [4], долгие годы строили свои решения на основе импортных программных продуктов. Одной из таких

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

крупнейших в России горно-добывающих компаний является АК «АЛРОСА»[1, 2] [5]. В числе первых в отрасли компания перешла на комплексное цифровое решение задач горной технологии и ей потребовалось в ограниченные сроки перестроиться на отечественные решения. Отметим, что ГГИС и другие смежные цифровые решения в области горного дела насыщены специфическим функционалом, разработка которого требует соответствующего кадрового и научного обеспечения. Это инструменты, построенные на использовании методов оптимизации технологических решений [6-8], имитационного моделирования [9-11], геостатистики [12-14], машинного обучения [15, 16] и обработки данных большого объема [17].

В результате анализа функционала немногочисленных российских программных продуктов класса ГГИС АК «АЛРОСА» в качестве корпоративной системы выбрала решение, разрабатываемое ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ» [18] в тесном контакте с Горным институтом КНЦ РАН [19]. Выбор был обусловлен наличием достаточно развитого функционала в области геологии, маркшейдерии, технологии открытых и подземных горных работ, реализованного на основе трехмерной графики и многопользовательской работы с БД. Летом 2022 г. между компаниями АК «АЛРОСА» и ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ» был подписан меморандум о стратегическом сотрудничестве в сфере информационных технологий, где АК «АЛРОСА» выступила индустриальным партнером, а ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ» – разработчиком цифровых решений на платформе ГГИС MINEFRAME. С учетом того, что горно-добывающие дивизионы АК «АЛРОСА» представлены как открытыми, так и подземными горными работами, а сама компания имеет опыт внедрения и сформированное представление о цифровых бизнес-процессах, подготовлен детальный план адаптации и развития функционала ГГИС, отвечающий требованиям не только индустриального партнера, но и в целом горно-добывающей отрасли.

Значительный объем работ, заключающийся не только в развитии функционала ГГИС, но и переходе на новый технологический стек, потребовал увеличения в разы численного состава ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ» и организации тесного взаимодействия с заказчиком. Одним из основных требований к бизнес-процессам инженерного обеспечения горных работ являлась их реализация в едином цифровом пространстве объектов горной технологии, формируемом на базе ГГИС MINEFRAME. При этом заказчик установил жесткие требования по информационной безопасности и реализации ролевой пользовательской модели доступа к данным. Другое серьезное требование – переход на кросс-платформенные решения, позволяющие при необходимости в ближайшее будущее перейти на отечественные операционные системы.

Методы

Решение задачи импортозамещения программного обеспечения в горно-добывающей промышленности (отрасли, имеющей дело со сложными природно-техническими системами) должно рассматриваться не как рутинная технико-организационная операция, а как управляемый междисциплинарный научно-инженерный процесс, требующий системного методологического подхода. Его необходимо реализовать в рамках жизненного цикла цифровой технологии, сочетающей элементы гибридного управления (Agile + Waterfall) и ориентированной на поэтапное удовлетворение функциональных, технологических и организационных требований. Задача решалась при наличии существенных ограничений – сложности и разнообразия геотехнических данных, тщательного согласования частных технических заданий, необходимости бесперебойной работы действующих технологических процессов и ограниченного срока (2,5 года) на адаптацию и внедрение, включающего несколько ключевых этапов:

• Оценка зрелости цифровой инфраструктуры горно-добывающего предприятия и выявление критических технологических разрывов.

• Разработка архитектурной модели импортозамещающего ПО с учетом функциональных, нефункциональных и интеграционных требований.

[1] Алмазы не навсегда: почему «Алроса» займется золотодобычей и чего ждать инвесторам. URL: https://www.forbes.ru/investicii/519061-almazy-ne-navsegda-pocemu-alrosa-zajmetsa-zolotodobycej-i-cego-zdat-investoram (дата обращения 01.04.2025).

[2] «Алроса»: есть ли перспективы у компании? URL: https://ru.investing.com/analysis/article-200311677 (дата обращения 01.04.2025).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Адаптация и реплатформинг на основе открытых стандартов, кросс-платформенных решений (например, Vulkan, PostgreSQL) и веб-ориентированных архитектур.

• Интеграция и валидация в производственной среде с построением интерфейсов с внешними системами (системы управления горно-геологическими данными, геомеханический мониторинг, диспетчеризация и ERP), унификацией справочников и классификаторов, а также апробацией алгоритмов на реальных геологических и технологических данных при решении типовых бизнес-задач.

• Организационно-технологическое сопровождение с обучением персонала, формированием регламентов эксплуатации и непрерывной технической поддержкой.

Такой подход основан на принципах системной инженерии и управления технологическими изменениями, что позволяет обеспечить не только техническую работоспособность системы, но и ее устойчивое функционирование на производстве. В качестве метрик эффективности реализации методического подхода на реальных горно-добывающих предприятиях предлагаются показатели: степень замещения импортных решений; снижение стоимости владения; рост производительности геологических, маркшейдерских и технологических отделов; уровень удовлетворенности пользователей; время реакции на изменение горнотехнических условий. Таким образом, методический подход превращает импортозамещение из задачи технической модернизации в научно-организованный процесс цифровой трансформации, способствующий формированию устойчивого, безопасного и технологически независимого цифрового ландшафта горного производства.

Следуя положениям этого методического подхода, перед началом работ по интеграции отечественной ГГИС в процесс инженерного обеспечения горных работ специалистами ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ» была сделана оценка уровня внедрения цифровых технологий в различных подразделениях АК «АЛРОСА», что послужило основой для формирования плана адаптации и доработки ПО. Для наиболее важных бизнес-процессов разработаны переходные и целевые диаграммы (to be) (рис.1).

Адаптация и доработка программ, входящих в состав ГГИС, под требования АК «АЛРОСА» осуществлялась одновременно по нескольким направлениям:

• Переход на СУБД PostgreSQL, интеграция процедур авторизации пользователей и доступа к данным со службой каталогов Active Directory.

• Расширение средств импорта данных наиболее распространенных форматов CAD и ГГИС, обмена данными формата MS Excel.

• Перевод редактора геологической БД на Web-платформу с одновременным развитием инструментов фильтрации и проверки данных, учетом требований ГКЗ при подсчете кондиций, реализацией возможности хранения и обработки геофизических данных.

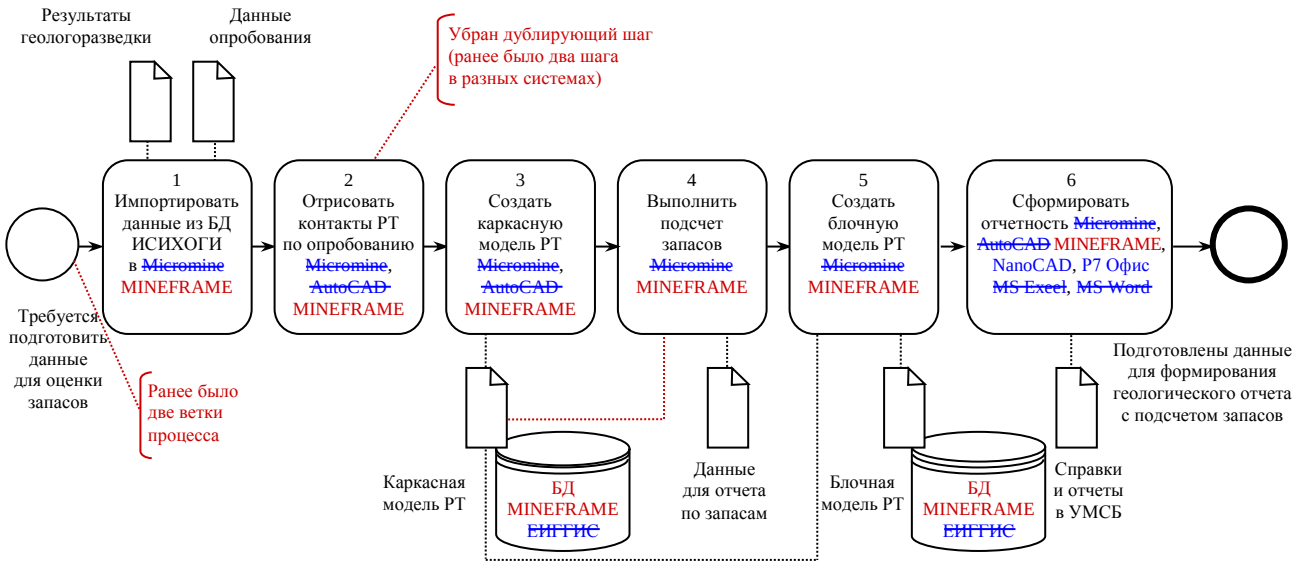


Рис.1. Фрагмент диаграммы адаптации бизнес-процесса «Моделирование месторождения, оценка запасов»

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Перевод графического редактора (desktop-приложение для решения в 3D-пространстве горно-геологических задач) с API DirectX (Windows) на Vulkan (Windows, Linux).

• Расширение функционала инструментов статистических и геостатистических исследований до уровня, обеспечивающего решение большинства задач, встречающегося в практике поисковой и эксплуатационной разведки [12, 20, 21].

• Работа с блочными моделями размерностью в сотни миллионов блоков.

• Реализация функций неявного (условного) моделирования [22, 12] поверхностей геологических тел на наборе пространственно распределенных данных разведки.

• Реализация инструментов работы с облаками точек [23-26] (по результатам лазерного сканирования подземных выработок, бортов карьеров, отвалов) с построением моделей технологических объектов. Особенностью моделей ГГИС MINEFRAME является их структура, сформированная для решения технологических задач, а не просто отрисовки их векторных и каркасных моделей.

В качестве примера реализации функциональных требований по плану адаптации ГГИС можно остановиться на следующих инструментах.

Геология. Доработка ПО осуществлялась с целью предоставления специалистам набора инструментов, обеспечивающих решения всего комплекса геологических задач:

• Инструменты статистической обработки данных геологоразведки – расчет статистики по числовым компонентам, полученным по результатам аналитики и подсчета запасов с использованием блочных моделей; визуализация распределения разведочных данных, выделение доменов с высокими или ураганными содержаниями на гистограмме; акцентирование ураганных содержаний несколькими методами с помощью различных графиков, включая децильный анализ; построение диаграммы рассеяния по нескольким компонентам из одного источника данных; создание графика «ящик с усами» с оценкой медианы, квантилей, дисперсии и асимметрии данных; Swath-графика, отображающего распределение содержаний в нескольких направлениях; формирование графика зависимости тоннажа от среднего содержания по вариантам бортовых содержаний в блочной модели.

• Инструменты интерактивной работы с моделями проб для их включения или исключения из расчета содержания полезного компонента в выделенном объеме.

• Инструменты сопоставления данных соседних геологоразведочных скважин для выделения и прослеживания одновозрастных комплексов, горизонтов, пластов и пропластков.

• Инструменты оценки пространственной неоднородности (вариографии) данных с помощью методов геостатистики и применения выявленных закономерностей при интерполяции данных с использованием кригинга.

Маркшейдерия. Важной задачей маркшейдерского обеспечения подземных горных работ является создание моделей выработок на основе данных съемки. Для этого используются несколько методов. Один из основных – тахеометрическая съемка поверхности выработки, в результате которой формируется список трехмерных координат относительно небольшого количества точек, задающих границы размещения выработки. Для повышения точности моделей пройденных выработок был разработан алгоритм, позволяющий в автоматическом режиме вписывать проектные сечения выработок в контуры съемки с привязкой сечений к отснятым точкам, что повышает точность оценки объемов проходки по данным моделирования. Улучшенный алгоритм одновременно с этим позволил решить задачу формирования оси выработки (необходима для решения задач транспортировки при планировании горных работ) при наличии ниш, вывалов, односторонних сужений и расширений.

Получили развитие инструменты формирования фактических моделей выработок по облаку точек, полученному в результате сканирования. Реализован алгоритм перехода от облака точек, описывающих поверхность выработки, к набору ее сечений, что позволило существенно снизить «вес» векторных и каркасных моделей, сделав их при этом более информативными в области инженерной графики.

Геотехнология. Эволюция методов моделирования подземных горных выработок указывает на переход к более детальному представлению их сечений и сопряжений. Как в зарубежных,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

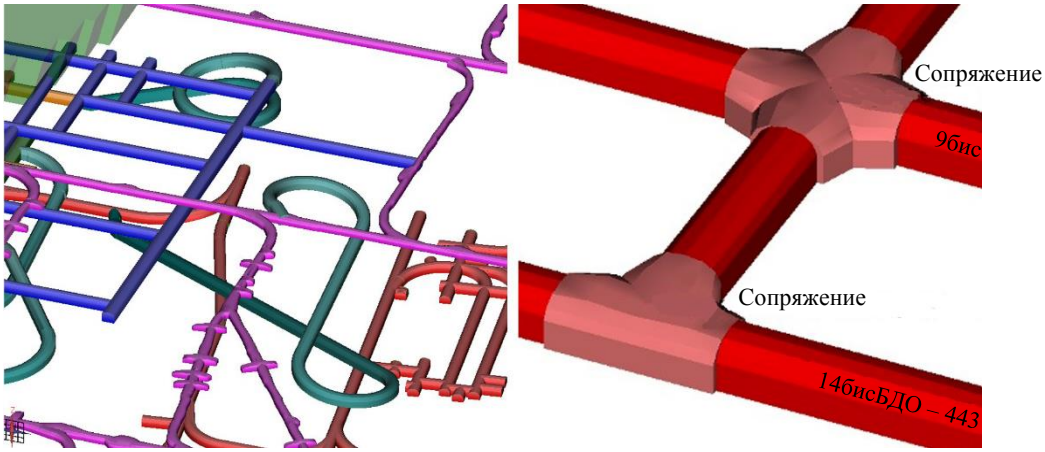


Рис.2. Автоматизированное проектирование выработок и их сопряжений на основе типовых сечений

так и отечественных ГГИС автоматизация процесса проектирования выработок, как правило, отсутствует, что влияет на скорость проектирования и точность моделей. Для автоматизации этого процесса в MINEFRAME создан набор инструментов, обеспечивающий параметрическое моделирование выработок и их сопряжений на основе набора сечений (рис.2), для создания которых используются типовые или пользовательские формулы расчета. Управление формой при выбранном типе сечений осуществляется заданием ширины и высоты выработки, привязка сечений к оси выработки и их расстановка на линейных участках и закруглениях – через задание параметров создаваемых моделей.

Важной частью процесса проектирования выработок является выбор типа крепи и расчет ее параметров. Разработан алгоритм автоматизированного подбора паспорта крепления выработок исходя из горно-геологических и геомеханических условий ведения горных работ. При разработке алгоритма проанализированы применяющиеся на горно-добывающих предприятиях инструкции по креплению горных выработок, что позволило обобщить существующий опыт и представить его в виде набора цифровых решений.

Расширен перечень инструментов проектирования открытых горных работ в направлении автоматизации создания конструктивных элементов карьера. С этой целью реализован алгоритм, позволяющий на основе линии бровки уступа (верхняя или нижняя) и контура уже построенного съезда создавать площадки торможения заданной длины и ширины. Инструмент учитывает возможность стыковки съездов разной и равной ширины, позволяет последовательно создавать несколько съездов и площадок, автоматически определяет различные элементы карьера и значительно сокращает время проектирования.

Получили развитие инструменты подсчета тоннажа по объемно-качественным показателям в моделях геологических и технологических объектов. Разработанные подходы позволяют с высокой точностью подсчитать объемно-качественные показатели по атрибутам блочных моделей в выделенных объемах моделируемого пространства. В качестве таких объемов могут быть запасы горизонтов, блоков, отдельных выемочных единиц. Доработанный функционал позволяет оперировать значениями плотности и других свойств массива, создавая условия для более точного учета его характеристик.

В качестве примера взаимодействия с решениями сторонних разработчиков может быть рассмотрена интеграция со специализированным ПО[3] [27], предназначенным для трехмерного моделирования и расчета технологических показателей добычи полезных ископаемых подземным способом в системе подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды. Такая связка позволяет

[3] От кимберлитовых массивов – к массивам информации. URL: https://b2partner.ru/modules/article/ot_kimberlitovih_massivov__k_massivam_informatsii?ysclid=m84905domb750533797 (дата обращения 01.04.2025).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис.3. Схема модуля автоматизированного планирования горных работ

синхронизировать данные об элементах залегания месторождений, результатах моделирования и расчета показателей извлечения при выпуске горной массы, что повышает точность планирования горных работ. В результате интеграции реализован обмен данными, обеспечивающий неразрывность процессов проектирования и планирования горных работ.

Планирование горных работ. Отдельным большим направлением стала разработка модулей среднесрочного и оперативного планирования для открытого и подземного способов ведения горных работ. В тесном взаимодействии с рабочей группой АК «АЛРОСА» сформулированы требования к функционалу, который должен обеспечивать автоматизацию создания технологически обоснованных планов на период от двух лет до недельно-суточного.

Модуль планирования открытых и подземных горных работ формируется на едином алгоритме оптимизации в рамках парадигмы программирования в ограничениях [28-32] и методах имитационного моделирования (рис.3). Основные принципы его работы:

• бесшовная работа с горно-геологическими моделями в среде ГГИС;

• автоматизированное формирование выемочных единиц;

• формирование календарного плана горных работ на разные периоды времени с возможностью разбиения их на временные интервалы: год, квартал, месяц, неделя, день;

• сквозная технология планирования горных работ, интегрирующая средне- и краткосрочные горизонты, а в перспективе и стратегический уровень;

• расчет и визуализация сценариев плана горных работ на основе ограничивающих факторов (последовательность отработки, производительность оборудования, ремонты/простои, ограничения на процессы) с отображением/редактированием, сравнением/анализом сценариев;

• формирование пользовательской документации, включая графики работы оборудования, по результатам расчета плана горных работ.

Базовые требования к инструментам планирования подземных горных работ (рис.4):

• учет длительности циклов технологических процессов (закладки, очистной выемки, проходки и т.п.);

• оценка объемов подготовительных и нарезных работ от планируемых объемов руды с учетом коэффициента подготовленных запасов;

• определение последовательности выемки объемов согласно регламенту системы разработки;

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

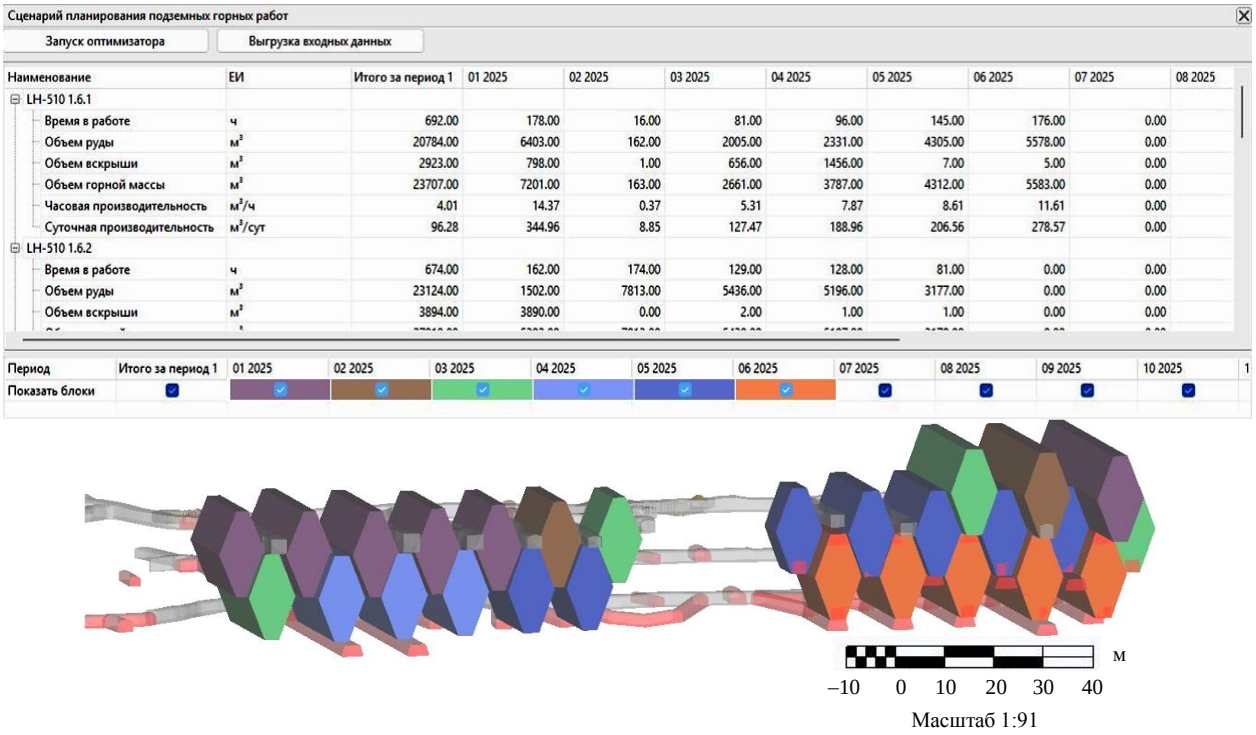


Рис.4. Планирование подземных горных работ с моделированием выемочных единиц

• реализация сценария планирования на основании заданных условий и скоростей проходки горных выработок, в том числе вблизи опасных зон и разломов;

• построение транспортной сети с заданием пропускной способности и емкости (например, рудоспуск) ее отдельных элементов;

• оценка производительности оборудования и его оптимального количества в зависимости от условий эксплуатации.

Базовые требования к инструментам планирования открытых горных работ (рис.5):

Количественные показатели	Сводный	Блок 2	Блок 3	Блок 4	Блок 5	Блок 6	Блок 7	Блок 8	Блок 9	Блок 1
Объем (м³)	1 962 635.99	207 723.91	225 472.90	194 194.52	72 291.07	281 334.30	225 000.45	225 000.00	225 046.87	120
Тоннаж (т)	4 814 188.75	515 542.37	552 845.64	475 276.70	180 373.68	694 369.95	536 704.72	537 615.60	558 862.97	297
Плотность (т/м³)		2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	
Влажность (%)		10	10	10	10	10	10	10	10	
Объем Высокий сорт (м³)	107 380.00	0.00	1 224.00	1 296.00	0.00	1 992.00	78 996.00	23 872.00	0.00	
Тоннаж Высокий сорт (т)	252 343.00		2 876.40	3 045.60		4 681.20	185 640.60	56 099.20		
Объем Низкий сорт (м³)	508 628.00	25 116.00	71 020.00	66 768.00	2 360.00	57 780.00	92 980.00	142 024.00	25 028.00	18
Тоннаж Низкий сорт (т)	1 195 275.80	59 022.60	166 897.00	156 904.80	5 546.00	135 783.00	218 503.00	333 756.40	58 815.80	43
Объем Пустая порода (м³)	1 346 627.99	182 607.91	153 228.90	126 130.52	69 931.07	221 562.30	53 024.45	59 104.00	200 018.87	101
Тоннаж Пустая порода (т)	3 366 569.95	456 519.77	383 072.24	315 326.30	174 827.68	553 905.75	132 561.12	147 760.00	500 047.17	254

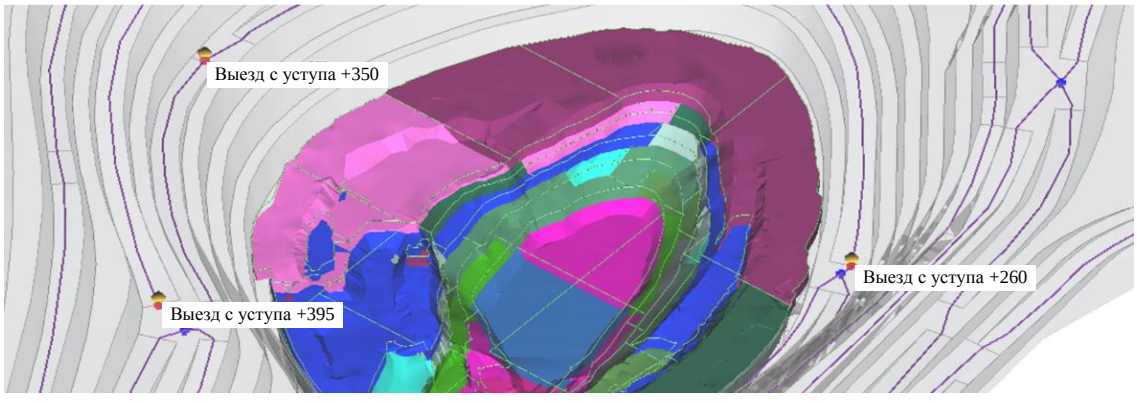


Рис.5. Планирование открытых горных работ с моделированием прирезок

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• учет технологических особенностей ведения вскрышных и добычных работ при работе экскаваторно-автомобильного комплекса, а также бульдозерного оборудования;

• соблюдение условий безопасности ведения горных работ;

• определение последовательности отработки выемочных единиц на разных горизонтах;

• построение сети транспортных коммуникаций, включая временные съезды;

• учет производительности горно-транспортного оборудования исходя из условий движения на каждом участке сети транспортных коммуникаций.

Создание горной цифровой платформы. Одним из важных направлений развития ГГИС MINEFRAME является создание на ее основе горной цифровой платформы (ГЦП), реализующей следующие принципы организации работы:

• разделение системных (создание, визуализация, редактирование, сохранение и загрузка моделей) и рабочих (решение конкретных горно-геологических задач) инструментов, что достигается созданием кросс-платформенного ядра и динамически подсоединяемых модулей;

• упрощение процесса разработки нового функционала за счет предоставления разработчикам документированных высокоуровневых API-функций доступа к классам моделей объектов и системным функциям работы с ними;

• повышение стабильности работы за счет закрытия доступа разработчикам рабочих инструментов к изменениям в ядре ГЦП;

• повышение скорости работы с БД за счет снижения трафика, связанного с сохранением только измененных частей моделей;

• использование связки БД локальная (пользовательская) – удаленная (корпоративная) для упрощения процедуры подключения и взаимодействия специалистов;

• предоставление возможности отображения истории создания моделей объектов во временном разрезе, что достигается сохранением всех изменений моделей в БД.

Архитектура ГЦП (рис.6) обеспечивает многопользовательскую работу с БД коллективного контролируемого доступа. При этом реляционный принцип организации БД поддерживает целостность данных, их сохранность и быструю реакцию на запросы, требующие передачи данных. Средства импорта, экспорта и анализа данных интегрируются с другими программами на горных предприятиях. Возможность использования сторонних цифровых данных и моделей тем более актуальна, что в связи с уходом из России зарубежных поставщиков ПО горно-добывающие предприятия крайне заинтересованы в сохранении годами формировавшейся информации [33]. Для MINEFRAME разработаны такие инструменты, которые позволяют без потерь

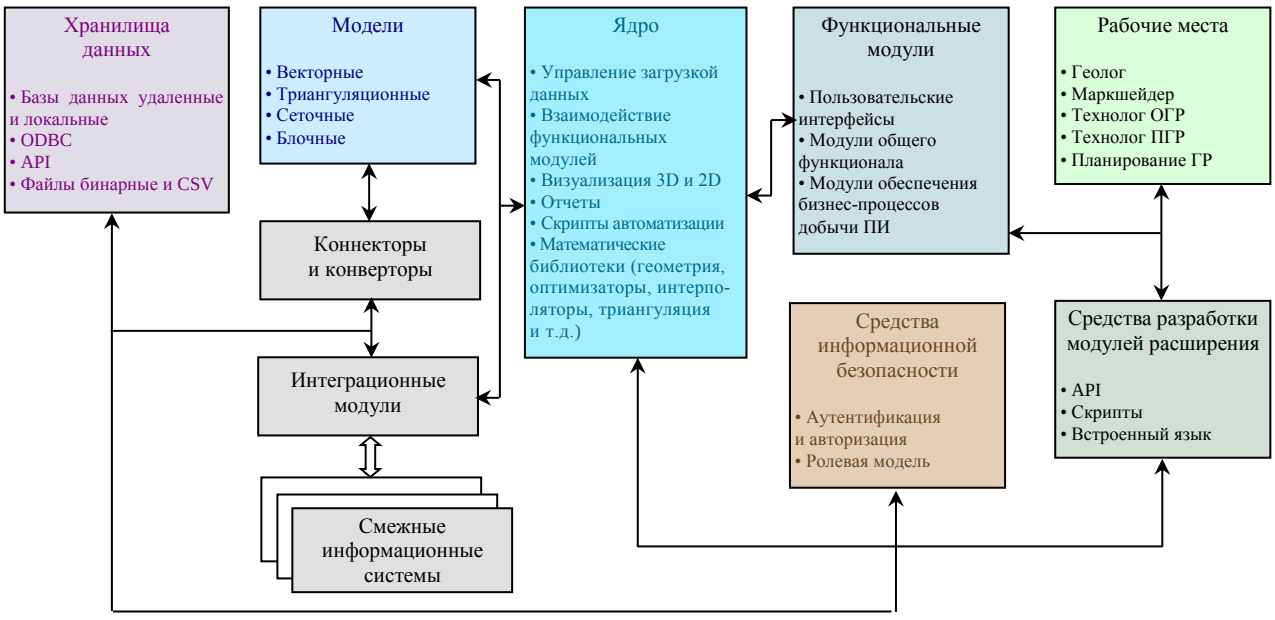


Рис.6. Архитектура ГЦП MINEFRAME

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

импортировать в среду ГЦП данные в форматах наиболее распространенных в России зарубежных ГГИС.

Обсуждение результатов

К настоящему времени работы по адаптации ГГИС под требования АК «АЛРОСА» в основном завершены, идет проверка и доработка отдельных рабочих инструментов. Основной акцент перенесен на разработку модулей планирования открытых и подземных горных работ, которые по заявленному в техническом задании функционалу должны соответствовать лучшим зарубежным аналогам, а по универсальности – превосходить их.

Масштаб проекта можно оценить несколькими показателями: проведено более 1500 рабочих встреч сотрудников заказчика и разработчика; поставлено 106 крупных задач, которые трансформировались в более чем 3000 элементарных задач для разработки; по мере реализации и представления заказчику разработанного функционала выявлено и удовлетворено более 150 замечаний.

Анализ практики успешного взаимодействия с компанией АК «АЛРОСА» и другими представителями горно-добывающей отрасли, предъявляющими требования к глубокой кастомизации ПО, позволяет сформулировать ключевые выводы, имеющие теоретическую и прикладную значимость:

• Специфика разработки отраслевых решений ПО класса ГГИС. Программное обеспечение данного класса характеризуется сложной архитектурой, формируемой под влиянием внутренних технологических и методологических процессов разработчика. Это обусловлено необходимостью адаптации специализированных алгоритмов и программных модулей к уникальным производственным условиям заказчика. Критически важно, чтобы заказчик учитывал экспертную позицию разработчика на этапах уточнения требований технического задания (ТЗ) и согласования графика реализации проекта. Игнорирование этого аспекта ведет к дисбалансу между ожиданиями сторон, некорректной постановке задач и, как следствие, снижению качества и функциональной устойчивости конечного продукта.

• Роль коммуникативной и креативной составляющих в управлении разработкой ПО. Процесс создания программных решений для горно-добывающей промышленности носит комплексный характер, сочетающий элементы системного проектирования, исследовательской деятельности и творческого подхода. Нормирование трудозатрат в таких проектах осложняется необходимостью решения нестандартных технических задач, а также зависимостью от уровня вовлеченности профильных специалистов заказчика в итеративные этапы разработки. Четкая формулировка бизнес-целей, совмещенная с глубоким пониманием возможностей технологической платформы, позволяет минимизировать риски временных и ресурсных издержек. Это достигается за счет ранней идентификации критических узлов проекта, согласования приоритетов и внедрения передовых методологий управления проектами, что в совокупности сокращает время выхода ПО на рынок и повышает отдачу инвестиций в цифровизацию.

• Критическая важность документирования процессов и требований. Успешная реализация проектов по адаптации как ГГИС, так и других сложных цифровых систем невозможна без детальной фиксации требований, бизнес-логики и технических спецификаций. Пренебрежение этапом документирования ведет к несоответствию ожиданий заказчика и интерпретации задач разработчиком, а также усложняет сопровождение системы на постпроектной стадии. Рекомендуется использовать комбинированные подходы – текстовые описания дополнять визуальными моделями, сценариями использования и примерами исходных данных, что снижает риск двусмысленности ТЗ.

• Необходимость обучения и трансфера знаний. Эффективное внедрение ПО требует не только технической адаптации, но и подготовки сотрудников заказчика. Часто наблюдается разрыв между функциональными возможностями системы и уровнем компетенций ее пользователей. Для минимизации этого разрыва необходимо предусмотреть проведение тренингов с акцентом на практические задачи, характерные для конкретного предприятия; создание инструкций и видеоуроков, адаптированных под бизнес-процессы заказчика; внедрение системы обратной связи для оперативной реакции на пробелы в обучении и выявленные потребности в совершенствования функционала ПО.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Стратегическая роль постпроектной поддержки и развития. Цикл взаимодействия не завершается сдачей проекта. Горно-добывающие компании, сталкиваясь с динамичными внешними условиями (изменения в законодательстве, технологические инновации, расширение производственных мощностей), требуют гибкости ПО. Это предполагает формирование долгосрочных партнерских отношений между заказчиком и разработчиком; включение в договорные обязательства условий по обновлению функционала, исправлению ошибок и масштабированию системы; использование модульной архитектуры ПО, позволяющей внедрять новые компоненты без переработки всей системы.

• Управление ожиданиями и баланс интересов сторон. Конфликты в проектах часто возникают из-за несоответствия ожиданий заказчика реальным возможностям технологий или ресурсным ограничениям. Для их предотвращения необходимо на этапе инициации проекта проводить аудит цифровой зрелости и инфраструктуры заказчика, анализ решений-аналогов; четко дифференцировать обязательные и желательные к реализации функции; устанавливать этапы промежуточной приемки результатов (например, этап минимально жизнеспособного продукта), чтобы своевременно корректировать направление разработки.

• Учет отраслевой специфики и регуляторных требований. Горно-добывающая отрасль характеризуется строгими стандартами безопасности, экологическими нормами и требованиями надзорных органов. Разработчику необходимо интегрировать в ПО инструменты для автоматизации отчетности в соответствии с региональными и международными стандартами; предусмотреть функции мониторинга рисков, включая геомеханические и гидрогеологические аспекты; обеспечить защиту данных, соответствующую отраслевым регламентам и цифровой инфраструктуре горно-добывающих холдингов.

• Анализ рисков и гибкость в управлении проектами. Высокая сложность и вероятностный характер геологических данных, элементы неопределенности при ведении горных работ требуют от разработчиков учета рисков, таких как неполные или противоречивые исходные данные от заказчика; технические ограничения существующего ИТ-ландшафта; периодическое изменение внешних условий (например, корректировка нормативной базы). Для минимизации последствий необходимо применять методологии управления рисками, закладывать резервные механизмы в календарные планы (буферные сроки, резерв бюджета).

Заключение

Эффективное сотрудничество между горно-добывающими компаниями и разработчиками как ГГИС, так и подобных им требует системного подхода, сочетающего технологическую экспертизу, управление коммуникациями и адаптацию к отраслевым вызовам. Успех проектов определяется не только технической реализацией, но и способностью сторон выстроить диалог, основанный на взаимном доверии, прозрачности и готовности к совместному решению нестандартных задач.

Опыт практической реализации проекта импортозамещения ГГИС на АК «АЛРОСА» позволил выйти на следующие показатели:

• полностью реализованы требования информационной безопасности, настроена синхронизация данных по расписанию, исключена потеря данных в результате доступа к файлам вне роли пользователя;

• обучено более 250 специалистов;

• развернуто семь сетевых баз данных, в них организовано 35 технологических проектов по площадкам внедрения;

• зарегистрировано более 200 учетных записей ролевой модели ГГИС;

• импортное ПО замещено на 95 %.

В высокой степени реализовано инженерное обеспечение ведения горных работ на шести месторождениях, в процессе внедрения еще пять. Таким образом, успешная реализация проектов по адаптации ГГИС потребовала синергии между технической экспертизой разработчика и процессно-технологическим опытом заказчика, что подтверждается как моделями управления ИТ-проектами, так и практическими результатами, представленными в статье.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Твердов А.А.* Последствия санкционной политики западного сообщества на область недропользования твердых полезных ископаемых // Недропользование XXI век. 2022. № 6 (98). С. 14-17.

2. *Лютягин Д.В., Забайкин Ю.В., Богачев М.Ю. и др.* Трансформация методических основ управления эффективностью горнодобывающих предприятий в условиях рисков санкционного воздействия // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2019. Т. 9. № 3В. С. 613-628.

3. *Лукичев С.В., Наговицын О.В.* Цифровая трансформация и технологическая независимость горнодобывающей отрасли // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 74-78. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-74-78

4. *Barnewold L., Lottermoser B.G.* Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. Iss. 6. P. 747-757. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.07.003

5. *Бобова М.* Эксперты «Алроса»: игнорирование цифровизации – бегство от решения проблем // Добывающая промышленность. 2024. № 4 (46). С. 156-160.

6. *Mai L., Saw Z.* Chapter 10 – Optimization of large mining supply chains through mathematical programming // Applications of Artificial Intelligence in Mining and Geotechnical Engineering. Elsevier, 2024. P. 165-182. DOI: 10.1016/B978-0-443-18764-3.00022-9

7. *Furtado e Faria M., Dimitrakopoulos R., Pinto C.* Stochastic stope design optimisation under grade uncertainty and dynamic development costs // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2022. Vol. 36. Iss. 2. P. 81-103. DOI: 10.1080/17480930.2021.1968707

8. *Nelis G., Morales N.* A mathematical model for the scheduling and definition of mining cuts in short-term mine planning // Optimization and Engineering. 2022. Vol. 23. Iss. 1. P. 233-257. DOI: 10.1007/s11081-020-09580-1

9. *Рыльникова М.В., Власов А.В., Макеев М.А.* Обоснование условий применения автоматизированных систем управления открытыми горными работами строительства комплекса циклично-поточной геотехнологии в карьере с помощью имитационного моделирования // Горная промышленность. 2021. № 4. Р. 106-112. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-106-112

10. *Hadizadeh Ghaziani H., Monjezi M., Mousavi A. et al.* Design of Loading and Transportation Fleet in Open-Pit Mines using Simulation Approach and Metaheuristic Algorithms // Journal of Mining and Environment. 2021. Vol. 12. Iss. 4. P. 1177-1188. DOI: 10.22044/jme.2022.11450.2131

11. *Manríquez F., Pérez J., Morales N.* A simulation–optimization framework for short-term underground mine production scheduling // Optimization and Engineering. 2020. Vol. 21. Iss. 3. P. 939-971. DOI: 10.1007/s11081-020-09496-w

12. *Avalos S., Ortiz J.M.* Recursive convolutional neural networks in a multiple-point statistics framework // Computers & Geosciences. 2020. Vol. 141. № 104522. DOI: 10.1016/j.cageo.2020.104522

13. *Madani N.* Multi-collocated cokriging: An application to grade estimation in the mining industry // Mining goes Digital. Proceedings of the 39th International Symposium «Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry», 4-6 June 2019, Wroclaw, Poland. CRC Press, 2019. P. 158-167. DOI: 10.1201/9780429320774

14. *Deveci M., Varouchakis E.A., Brito-Parada P.R. et al.* Evaluation of risks impeding sustainable mining using Fermatean fuzzy score function based SWARA method // Applied Soft Computing. 2023. Vol. 139. № 110220. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110220

15. *Valencia J., Emami E., Battulwar R. et al.* Blasthole Location Detection Using Support Vector Machine and Convolutional Neural Networks on UAV Images and Photogrammetry Models // Electronics. 2024. Vol. 13. Iss. 7. № 1291. DOI: 10.3390/electronics13071291

16. *Levinson Z., Dimitrakopoulos R.* A reinforcement learning approach for selecting infill drilling locations considering long-term production planning in mining complexes with supply uncertainty // Mining Technology. 2024. Vol. 133. Iss. 2. P. 176-187. DOI: 10.1177/25726668241244930

17. *Badiezadeh T., Saen R.F., Samavati T.* Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach // Computers & Operations Research. 2018. Vol. 98. P. 284-290. DOI: 10.1016/j.cor.2017.06.003

18. *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. С. 159-166. DOI: 10.15372/FTPRPI20230316

19. *Корниенко А.В., Гурин К.П., Степачева А.В.* Применение современных подходов к разработке программного обеспечения в развитии горно-геологической информационной системы MINEFRAME // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2019. № 1 (63). С. 153-160. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.1.2019.63.153-160

20. *Araújo C. da P., Bassani M.A.A., Koppe V.C. et al.* Geostatistical simulations with heterotopic hard and soft data without modeling the linear model of coregionalization // REM – International Engineering Journal. 2021. Vol. 74. Iss. 2. P. 269-278. DOI: 10.1590/0370-44672020740075

21. *Chilès J.-P., Desassis N.* Fifty Years of Kriging // Handbook of Mathematical Geosciences. Springer, 2018. P. 589-612. DOI: 10.1007/978-3-319-78999-6_29

22. *Huang L., Balamurali M., Silversides K.L.* Machine learning classification of geochemical and geophysical data // Mining goes Digital. Proceedings of the 39th International Symposium «Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry», 4-6 June 2019, Wroclaw, Poland. CRC Press, 2019. P. 101-105. DOI: 10.1201/9780429320774

23. *Выстрчил М.Г., Балтыжакова Т.И., Савина А.В.* Алгоритм оценки точности полигональных TIN-поверхностей, получаемых из разреженных облаков точек // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2024. Т. 29. № 3. С. 5-19. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-3-5-19

24. *Колесатова О.С., Красавин А.В.* Повышение эффективности маркшейдерских измерений для определения объемов подземных выработанных пространств с помощью мобильных сканирующих систем // Глобус. 2020. № 5 (64). С. 76-78.

25. *Ferrero A.M., Migliazza M.R., Umili G.* Rock mass characterization by means of advanced survey methods // Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses. CRC Press, 2014. P. 17-27. DOI: 10.1201/b16955

26. *Buyer A., Schubert W.* Calculation the Spacing of Discontinuities from 3D Point Clouds // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 270-278. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.181

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

27. *Shekhar G., Gustafson A., Hersinger A. et al.* Development of a model for economic control of loading in sublevel caving mines // Mining Technology. 2019. Vol. 128. Iss. 2. P. 118-128. DOI: 10.1080/25726668.2019.1586371

28. *Van Hentenryck P., van Hoeve W.-J.* Constraint Programming // Encyclopedia of Optimization. Springer, 2023. 16 p. DOI: 10.1007/978-3-030-54621-2_713-1

29. *Зуенко А.А., Фридман О.В., Зуенко О.Н.* Парадигма программирования в ограничениях при решении задач составления расписаний: аналитический обзор // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 4. С. 156-179. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2022/4/156-179

30. *Morales N., Nancel-Penard P., Espejo N.* Development and analysis of a methodology to generate operational open-pit mine ramp designs automatically // Optimization and Engineering. 2023. Vol. 24. Iss. 2. P. 711-741. DOI: 10.1007/s11081-021-09702-3

31. *Nancel-Penard P., Morales N., Rojas V., González T.* A heuristic approach for scheduling activities with 'OR'-precedence constraints at an underground mine // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2020. Vol. 34. Iss. 10. P. 748-762. DOI: 10.1080/17480930.2020.1734152

32. *Rivera Letelier O., Espinoza D., Goycoolea M. et al.* Production Scheduling for Strategic Open Pit Mine Planning: A Mixed-Integer Programming Approach // Operations Research. 2020. Vol. 68. Iss. 5. P. 1425-1444. DOI: 10.1287/opre.2019.1965

33. *Цепина А.* Цифровизация горнодобывающей промышленности – 2024: мечты и реальность // Добывающая промышленность. 2024. № 4 (46). С. 24-30.

***Авторы*: Сергей Вячеславович Лукичев,** *д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, директор* (*Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *s.lukichev@ksc.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-2944-1913*, **Олег Владимирович Наговицын,** *д-р техн. наук, заместитель директора* (*Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия*), *генеральный директор* (*ООО «Лаборатория МАЙНФРЭЙМ», Апатиты, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-0115-8411*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0