

Технологии открытой отработки крупных золоторудных месторождений России к 2025 году (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское)

В. В. Арно^{1✉}, Е. П. Колесниченко², И. Ю. Гарифулина¹,
Е. С. Семькин¹, Н. А. Ремизов¹

¹ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт)»,
г. Магадан, Российская Федерация

²ВШЭ МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

✉ vvnika@mail.ru

Резюме. Анализируются современные технологии открытой отработки пяти крупнейших золоторудных месторождений России к 2025 году (Наталкинское и Павлик (Магаданская область), Хаканджинское (Хабаровский край), Култуминское (Забайкальский край) и Вернинское (Иркутская область)). Рассмотрены геолого-промышленные параметры, буровзрывная подготовка, экскаваторно-автомобильный и экскаваторно-конвейерный транспорт, дробильно-сортировочное оборудование, системы обогащения, цифровизация и геотехнический мониторинг. Выявлены геотехнические вызовы (многолетняя мерзлота, сейсмичность, короткий горный сезон) и предложены адаптированные решения. Экономический анализ демонстрирует рентабельность проектов (IRR – 12–40 %, окупаемость – 3–7 лет) при себестоимости добычи золота 550–900 USD/oz. Определены перспективы автономизации и применения искусственного интеллекта для повышения эффективности на 10–25 %.

Ключевые слова: открытая отработка, золоторудные месторождения, буровзрывные работы, экскаваторно-автомобильный транспорт, экскаваторно-конвейерный транспорт, цифровизация карьеров, геотехнический мониторинг, многолетняя мерзлота, дробление и обогащение, Наталкинское месторождение, Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское

Благодарности, признательность, финансирование: Авторы признательны компаниям АО «ЗРК «Павлик», ПАО «Полюс», АО «Охотская ГТК» и Highland Gold за содействие в организации исследований, предоставление геологических данных и ценные экспертные комментарии. Финансирование исследования осуществлено за счет собственных средств.

Для цитирования: Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Семькин Е.С., Ремизов Н.А. Технологии открытой отработки крупных золоторудных месторождений России к 2025 году (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское). *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (2): 4–13. <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-4-13>.

Open-pit mining technologies for major russian gold deposits by 2025 (Natalkinskoe, Pavlik, Khakandzhinskoe, Kultumisskoe, Verninskoe)

V. V. Arno^{1✉}, E. P. Kolesnichenko², I. Yu. Garifulina¹,
E. S. Semykin¹, N. A. Remizov¹

¹FGBOU VO “North-Eastern State University (Polytechnic Institute)”, Magadan, Russian Federation

²Higher School of Economics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

✉ vvnika@mail.ru

Abstract. This article analyzes modern open-pit mining technologies for five major Russian gold deposits by 2025: Natalkinskoe and Pavlik (Magadan Oblast), Khakandzhinskoe (Khabarovsk Krai), Kultuminskoe (Zabaikalsky Krai), and Verninskoe (Irkutsk Oblast). Geological and industrial parameters, drilling and blasting preparation, excavator-truck and excavator-conveyor transport systems, crushing and screening equipment, beneficiation systems, digitalization, and geotechnical monitoring are examined. Geotechnical challenges (permafrost, seismicity, short mining season) are identified with adapted solutions proposed. Economic

analysis demonstrates project profitability (IRR 12–40 %, payback period 3–7 years) with gold production costs of 550–900 USD/oz. Prospects for automation and artificial intelligence implementation to increase efficiency by 10–25 % are identified.

Keywords: open-pit mining, gold deposits, drilling and blasting, excavator-truck haulage, excavator-conveyor system, mine digitalization, geotechnical monitoring, permafrost, crushing and beneficiation, Natalkinskoe deposit, Pavlik, Khakandzhinskoe, Kultuminskoe, Verninskoe

Acknowledgments, funding, financial Support: The authors are grateful to Pavlik Gold Ore Company JSC, Polyus PJSC, Okhotsk Mining and Geological Company JSC, and Highland Gold for their assistance in organizing the research, providing geological data, and valuable expert comments. The research was funded by the authors.

For citation: Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Semykin E.S., Remizov N.A. Open-pit mining technologies for major russian gold deposits by 2025 (Natalkinskoe, Pavlik, Khakandzhinskoe, Kultuminskoe, Verninskoe). *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2026; 26 (2): 4–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-2-4-13>.

Введение

Открытые горные работы обеспечивают до 80 % золотодобычи в России, доминируя на крупных, средне- и глубоких месторождениях с относительно благоприятными геолого-промышленными условиями. К 2025 году пять ключевых объектов демонстрируют унифицированные, но климатически адаптированные схемы отработки. **Наталкинское** (Магаданская обл., Северо-Восток) – крупнейший открытый карьер с производительностью 20+ млн т/год и суммарными запасами более 50 млн т руды. **Павлик** (Магаданская обл.) – вторая по мощности система, с 8–10 млн т/год и участками ввода 12+ тонн золота в год. **Хаканджинское** (Охотский район Хабаровского края) – объект развивающегося типа с 5–7 млн т/год под управлением Охотской ГТК. **Култуминское** (Забайкальский край, Газимуро-Заводский район) – уникальное полиметаллическое месторождение с запуском в 2025 году; содержит 177,7 млн т медной руды С2-баланса (586,6 тыс. т меди), 117,5 тыс. кг золота и 906,4 т серебра. **Вернинское** (Бодайбинский район Иркутской области) – историческое месторождение мощностью 0,55–1,5 млн т/год с запасами 328,3 тонн Au (категория C1 + C2) [1–3].

Суровые условия региона (многолетняя мерзлота, резко континентальный климат, короткий горный сезон, высокая сейсмичность) определяют специфику технологических решений: используются буровзрывная подготовка с геотехническим мониторингом, экскаваторно-автомобильный и экскаваторно-конвейерный транспорт, мобильное дробление и цифровизация на базе ГИС и систем диспетчеризации (Wenco Fleet, ВИСТ-А «Цифра. Карьер»).

Цель исследования: анализ современных технологических решений открытой отработки крупных золоторудных месторождений России в 2025 году, включая оценку геологических параметров, экономической эффективности, геотехнических вызовов и перспектив автоматизации.

Объекты исследований

Анализ охватил пять крупнейших открытых карьеров России, выбранных по критериям: запасам золота (4–50 млн т эквивалента минерального сырья с содержанием Au 0,8–5 г/т), производительности (4–20 млн т/год добычи руды), развитию технологий (применение современных ГИС, диспетчеризации, мобильного дробления, геомониторинга к 2025 г.), географии (охват Северо-Востока России, Забайкалья и Сибири).

Анализ технологических схем – систематизация буровзрывных параметров, типов экскаваторов (ЭКГ-15М, ЭКГ-20К, Liebherr), автосамосвалов («БелАЗ-7513» грузоподъемностью 130–220 т), конвейерных систем.

Оценка цифровизации – платформы ГИС (Micromine), системы диспетчеризации («Цифра. Карьер» ВИСТ-А, Wenco Fleet).

Геотехнические параметры – высота бортов (200–400 м), углы откосов, системы мониторинга мерзлоты (НПП «Эталон», Ростех).

Методы исследований

Метаанализ источников: публикаций Роснедр, компаний-операторов (ОАО «Полюс», Арлан, Highland Gold), научных изданий по геотехнике и цифровизации.

Результаты исследований

В результате проведенного анализа была систематизирована и сопоставлена совокупность параметров, определяющих геолого-промышленный облик исследуемых объектов. На основании геологических, структурных, минералогических и технологических данных выполнено обобщение ключевых характеристик, влияющих на выбор технологии открытой отработки, производительность добычных комплексов и экономическую эффективность эксплуатации карьеров [3–5].

Особое внимание уделено сопоставлению морфологических особенностей рудных тел, мощности и глубины залегания, минерального состава, содержания полезных компонентов, а также геокриологических и сейсмотектонических условий, определяющих специфику проектирования горно-технических систем.

Сводные результаты этого анализа представлены в таблице 1, где отражены основные параметры каждого из пяти рассматриваемых объектов и выявленные закономерности их структурно-технологической организации.

Исходя из анализа (табл. 1) выявляется существенная дифференциация месторождений по геологическим признакам. Наталкинское и Павлик типичны для девонских метаморфических золоторудных провинций Северо-Востока с прожилково-вкрапленным стилем. Хаканджинское отличается более высоким уровнем жильного оруденения. Култуминское уникально как полиметаллическое (медь – железо – золото), скарновое месторождение. Вернинское демонстрирует наиболее высокое содержание золота (3–5 г/т).

В результате последующего этапа исследования проведен детальный анализ геологических и тектонических факторов, контролирующих формирование и пространственное положение рудных тел [3, 6–7].

На основе структурно-геологических разрезов, данных буровых работ и материалов геофизических съемок выполнено сопоставление условий залегания, характера и углов

погружения рудных зон, их простирания, формы и тектонической приуроченности.

Особое внимание уделено взаимосвязи рудоконтролирующих разломов, морфологии рудных тел и геодинамических

условий формирования минерализованных зон, а также влиянию сейсмичности и криогенных процессов на устойчивость горных массивов.

Систематизированные результаты анализа представлены

Таблица 1 / Table 1

**Геолого-промышленная характеристика месторождений /
Geological-industrial characteristics of deposits**

Параметр / Parameter	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Регион / Region	Магаданская обл. / Magadan Oblast	Магаданская обл. / Magadan Oblast	Хабаровский край / Khabarovsk Krai	Забайкальский край / Zabaikalsky Krai	Иркутская обл. / Irkutsk Oblast
Запасы, млн т руды / Reserves (million tons ore)	50–80	35–50	12–18	177,7 (С2)	328,3 т Au
Содержание Au, г/т / Au content (g/t)	2–3	1,5–2,5	1–2	0,67–1,2	3–5
Содержание других металлов / Other metals content	–	–	–	Cu – 0,33 %, Ag – 906 т	–
Тип оруденения / Ore type	Прожилково- вкрапленный / Veinlet-disseminated	Смешанный / Mixed	Кварцево-жильный / Quartz-vein	Скарновое / Skarn	Кварцево-жильное / Quartz-vein
Глубина главной зоны, м / Main zone depth (m)	200–400	150–350	100–250	300–600	170–300
Мощность рудных зон, м / Ore zone thickness (m)	50–150	30–100	20–80	10–50	30–80
Производительность ДСЗ, млн т/год / Processing plant capacity (million t/year)	15–20	8–10	5–7	13	0,55–1,5
Геологический возраст руд / Ore geological age	Девон-карбон / Devonian-Carboniferous	Девон / Devonian	Девон / Devonian	Ордовик-силур / Ordovician-Silurian	Верхний протерозой / Upper Proterozoic
Среднее содержание сульфидов, % / Average sulfide content (%)	2–4	2–3	1–3	2–5	0–3
Главные сульфиды / Main sulfides	Пирит, арсенопирит / Pyrite, arsenopyrite	Пирит, сфалерит / Pyrite, sphalerite	Пирит, халькопирит / Pyrite, chalcopyrite	Магнетит, халькопирит / Magnetite, chalcopyrite	Пирит, арсенопирит / Pyrite, arsenopyrite

Таблица 2 / Table 2

**Условия залегания рудных тел и структурные особенности /
Conditions of ore body occurrence and structural features**

Характеристика / Characteristic	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Главная рудоконтролирующая структура / Main ore-controlling structure	Синклиальная складка / Synclinal fold	Линзовидное тело / Lenticular body	Разломная зона / Fault zone	Скарновый контакт / Skarn contact	Антиклиналь / Anticline
Угол погружения рудных зон, град. / Ore zone dip angle (°)	25–45	30–50	40–60	30–50	25–55
Простирание зон / Zone strike	ЗСЗ / WNW	ЗСЗ / WNW	Субширотное / Sublatitudinal	Субширотное / Sublatitudinal	ЗСЗ / WNW
Сейсмичность, балл (М макс.) / Seismicity, score (M max)	7–8 (М 7,5)	6–7	6–7	5–6	5
Мерзлота, характер / Permafrost character	Повсеместная многолетняя / Widespread continuous	Повсеместная / Widespread	Повсеместная / Widespread	Редкая / Rare	Редкая / Rare
Глубина деятельного слоя (м) / Active layer depth (m)	0,5–2	0,5–1,5	0,5–1,5	—	—
Температура минерализации, °С / Mineralization temperature (°C)	—	—	—	—	246–356
Геобарические условия, бар / Geobaric conditions (bar)	—	—	—	—	1390–3170
Содержание CO ₂ в флюиде, моль/кг / CO ₂ content in fluid (mol/kg)	—	—	—	—	1,4–8,6
Содержание Au в флюиде (мг/л) / Au content in fluid (mg/L)	—	—	—	—	0,031–0,124

в таблице 2, где обобщены основные параметры геологического строения месторождений и их тектонические характеристики, определяющие выбор схемы разработки и критерии устойчивости карьерных бортов.

Геотектонический анализ (табл. 2) демонстрирует: Северо-Восток (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское) характеризуется высокой сейсмичностью ($M_{6,5-7,5}$), требующей специального проектирования бортов карьера. Вернинское месторождение позволяет детально изучить флюидные параметры: температуры минерализации – 246–356 °С, геобарические условия – 1,39–3,17 кбар, что соответствует глубине ~12 км, отражая глубинный магматический источник флюидов.

На основе комплексного анализа систематизированы технологические параметры ведения горных работ, определяющие интенсивность и безопасность освоения карьерных полей. По данным проектной документации и фактических эксплуатационных сведений выполнено сопоставление ключевых показателей буровзрывного комплекса, включая геометрию сеток скважин, удельные расходы взрывчатых веществ и специфику подготовки массивов в различных климатических зонах. При этом особое внимание уделено адаптации параметров буровзрывных работ к условиям многолетней мерзлоты, оценке эффективности используемого бурового оборудования и анализу сезонности работ, ограничивающей годовую производительность добычных систем.

Сводные данные этого этапа исследования отражены в таблице 3, где представлены расчетные показатели и технические решения, обеспечивающие требуемую степень дробления горной массы для каждого из рассматриваемых объектов.

Исходя из анализа (табл. 3) выясняется, что на мерзлотных объектах (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское) цикл БВР увеличивается на 20–30 % из-за предварительного оттаивания, расход ВВ выше (0,4–0,6 кг/м³ вместо 0,3–0,4). Вернинское демонстрирует минимальный цикл (4–6 ч) благодаря отсутствию мерзлоты. Сезонность критична: на Северо-Вос-

токе активность сосредоточена в июне – октябре (~150 дн.), Вернинское разрабатывается круглогодично.

В продолжение технологического анализа выполнена детальная систематизация характеристик основного горнотранспортного оборудования, обеспечивающего циклическую транспортировку горной массы от забоя до пунктов разгрузки [7–9].

На основе технических паспортов эксплуатируемой техники, данных диспетчерских систем и проектных решений проведено сопоставление парка экскаваторного и автомобильного оборудования, включая типы машин, их производительность, численность единиц и эксплуатационные показатели в различных горно-геологических и климатических условиях. Особое внимание уделено анализу грузоподъемности автосамосвалов, дальности транспортирования, коэффициентов использования техники и удельного расхода топлива, которые в совокупности определяют экономическую эффективность экскаваторно-автомобильных комплексов в условиях многолетней мерзлоты и экстремальных температур.

Обобщенные результаты представлены в таблице 4, где отражены технико-эксплуатационные характеристики горнотранспортных систем пяти исследуемых месторождений и выявлены закономерности формирования парка оборудования в зависимости от масштаба производства.

На Наталкинском эксплуатируется 8–12 экскаваторов (крупнейшая система в РФ), на Вернинском – 2–3 (табл. 4). Грузоподъемность: «БелАЗ-7513» (220 т) доминирует на Северо-Востоке; на Вернинском – компактная техника (60–90 т). Расход топлива на Северо-Востоке (0,25–0,35 л/т·км) выше на 15–40 % из-за мороза. Коэффициент использования автопарка: 0,68–0,76 – на Северо-Востоке, 0,75–0,82 – на Вернинском [9–11].

В рамках дальнейшего анализа технологических решений рассмотрены системы непрерывной транспортировки горной массы и узлы первичной переработки, формирующие основу циклично-поточных схем в карьерах большой глуби-

Таблица 3 / Table 3

Параметры буровзрывных работ и отработки карьеров /
Drilling and blasting parameters and pit mining

Параметр / Blasting parameter	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Диаметр скважин, мм / Borehole diameter (mm)	200–250	200–250	150–200	200–250	100–150
Глубина скважин, м / Borehole depth (m)	12–15	12–15	10–12	12–15	8–10
Высота уступа, м / Bench height (m)	15–20	15–20	10–15	15–20	10–12
Расход ВВ, кг/м ³ / Explosive consumption (kg/m ³)	0,4–0,6	0,35–0,5	0,3–0,5	0,4–0,6	0,3–0,4
Тип ВВ / Explosive type	АНФО + ДШ / ANFO + DS	АНФО + ДШ / ANFO + DS	АНФО + ДШ / ANFO + DS	АНФО + ДШ / ANFO + DS	Аммониты / Ammonites
Цикл БВР, ч / Blasting cycle (hours)	6–10	6–8	5–7	6–8	4–6
Коэффициент использования оборудования / Equipment utilization factor	0,70–0,75	0,72–0,76	0,65–0,70	0,70–0,75	0,75–0,80
Буровое оборудование / Drilling equipment	Sandvik, Atlas Copco	Sandvik, Boart Longyear	Atlas Copco	Sandvik	ШБ-300, Sandvik
Технология оттаивания / Thawing technology	Тепловая, механическая / Thermal, mechanical	Механическая / Mechanical	Механическая / Mechanical	Не требуется / Not required	Не требуется / Not required
Сезонность, мес. / Seasonality (months)	VI–X	V–X	V–X	VIII–XI	IX–V

ны. На основе проектных данных и практики эксплуатации выполнено сопоставление вариантов экскаваторно-конвейерного транспорта и мобильного дробления с точки зрения производительности, конфигурации трасс, надежности и энергоэффективности, а также их влияния на снижение доли автотранспорта и удельных эксплуатационных затрат. Особое внимание уделено параметрам внедрения мобильных дробильных установок в забое (*inpit*), длине и типу конвейерных линий, коэффициентам использования оборудования, ожидаемой экономии топлива и оценке капитальных затрат и

сроков окупаемости с учетом климатических ограничений и сезонности работ.

Систематизированные результаты представлены в таблице 5, где отражены ключевые технические и экономические показатели применяемых и планируемых решений по каждому из пяти рассматриваемых объектов и выявлены условия, при которых конвейеризация становится технологически и финансово обоснованной [2, 12–14].

Наталкинское инвестирует в конвейеризацию для снижения себестоимости при глубинах >250 м; экономия топли-

Таблица 4 / Table 4

**Техника и параметры экскаваторно-автомобильного транспорта /
Excavator-Truck Haulage Equipment and Parameters**

Параметр / Parameter	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Основные модели экскаваторов / Main excavator models	Liebherr R9100, ЭКГ-20К	ЭКГ-15М, ЭКГ-20К	Liebherr R995, Hitachi EX5500	Liebherr R9100	ЭКГ-15М, CAT 374
Емкость ковша, м³ / Bucket capacity (m³)	6–9	6–8	5–7	6–9	3–5
Производительность экскаватора, т/смену / Excavator productivity (t/shift)	1800–2200	1600–2000	1200–1800	1800–2200	800–1200
Экскаваторный парк, шт. / Excavator fleet (units)	8–12	6–8	3–5	6–8	2–3
Основные марки автосамосвалов / Main truck models	«БелАЗ-7513», «БелАЗ-75306»	«БелАЗ-7513», Volvo FMX	«БелАЗ-75306», Scania	«БелАЗ-7513», Volvo FM	«Урал-6370», «Ман ТГА»
Грузоподъемность, т / Payload capacity (t)	180–220	130–220	130–150	220	60–90
Расстояние перевозки, км / Haul distance (km)	3–10	2–8	1–5	3–12	0,5–3
Количество автосамосвалов / Truck fleet (units)	15–25	10–15	8–12	12–18	3–5
Коэффициент использования / Utilization factor	0,68–0,74	0,70–0,76	0,65–0,72	0,70–0,75	0,75–0,82
Расход топлива (л/т-км) / Fuel consumption (L/t-km)	0,25–0,35	0,22–0,30	0,25–0,35	0,22–0,30	0,20–0,28

Таблица 5 / Table 5

**Экскаваторно-конвейерный транспорт и мобильное дробление /
Excavator Conveyor Transport and Mobile Crushing**

Параметр / Parameter	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Применение конвейеров / Conveyor application	Пилотный этап / Pilot stage	Планируется / Planned	Не планируется / Not planned	Основная схема / Main scheme	Минимум / Minimal
Тип конвейерной системы / Conveyor system type	Ленточный + крутонаклонный / Belt + steep-inclined	Ленточный / Belt	—	Крутонаклонный / Steep-inclined	—
Длина конвейера, км / Conveyor length (km)	1,5–3	—	—	2–3	—
Производительность, млн т/год / Capacity (million t/year)	5–8	—	—	8–13	—
Мобильная дробилка тип / Mobile crusher type	Sandvik QJ341	Не установлена / Not installed	Щековая / Jaw	Metso Outotec	Минимум / Minimal
Производительность МДПУ, т/ч / Crusher capacity (t/h)	150–300	—	100–150	200–350	—
Коэффициент использования / Utilization factor	0,82–0,88	—	—	0,85–0,90	—
Снижение расхода топлива, % / Fuel consumption reduction (%)	40–50	—	—	35–45	—
Капитальные затраты, млн USD / Capital costs (million USD)	50–80	—	—	60–100	—
Окупаемость, лет / Payback (years)	4–6	—	—	5–7	—

ва – 40–50 %. Култуминское изначально спроектировано с конвейерной системой как основной (13 млн т/год). Павлик, Хаканджинское, Вернинское остаются на автомобильной схеме из-за меньших мощностей. Окупаемость конвейера – 4–7 лет, оправдана для крупных объектов (табл. 5).

В рамках следующего этапа исследования выполнена систематизация параметров переработки рудного сырья, определяющих технологическую реализуемость проекта и фактическую величину извлечения полезных компонентов. На основе проектных показателей и эксплуатационных характеристик проведено сопоставление мощностей дробильно-сортировочных комплексов, конфигураций стадий дробления и грохочения, а также применяемых схем обогащения (гравитация, флотация и их комбинации) с учетом минералого-технологических особенностей руд. Особое внимание уделено выбору типоразмеров и производительности первичного и вторичного дробления, параметрам классификации по крупности, ожидаемым значениям извлечения золота и требованиям к хвостовому хозяйству, поскольку именно эти факторы формируют баланс «производительность – качество концентрата – экологические ограничения» и напрямую влияют на операционные затраты.

Сводные результаты представлены таблице 6, где обобщены ключевые технические характеристики перерабатывающих линий пяти рассматриваемых объектов и выявлены закономерности выбора схем подготовки и обогащения руды в зависимости от состава и типа оруденения.

Гравитационные методы доминируют на Наталкинском, Павлике, Хаканджинском благодаря простоте и низким затратам (~\$2–4/т). Флотация внедряется на Вернинском (сульфидные руды) и Култуминском (комплексная медно-золотая). Степень извлечения Au – 75–95 % в зависимости от типа (лучше при флотации сульфидов – 85–95 %). Хвостовое хозяйство – на Северо-Востоке требуются дамбы емкостью 50–100 млн т (табл. 6).

В завершающем блоке технологического анализа рассмотрен комплекс цифровых решений и автоматизированных

систем управления, формирующих информационную среду современного горного производства.

На основе данных о внедрении ИТ-инфраструктуры и отчетов компаний-операторов выполнено сопоставление платформ горно-геологического моделирования (ГИС), систем диспетчеризации горнотранспортного комплекса и средств позиционирования техники.

Особое внимание уделено функционалу систем геотехнического мониторинга (включая контроль устойчивости бортов и термометрию многолетнемерзлых грунтов), точности навигационных решений, механизмам аварийного оповещения, а также количественной оценке влияния цифровизации на производительность и перспективам перехода к безлюдным (автономным) технологиям добычи.

Систематизированные данные представлены в таблице 7, где отражен уровень автоматизации производственных процессов на пяти исследуемых объектах и выявлена взаимосвязь между внедрением интеллектуальных систем и безопасностью горных работ в сложных климатических условиях.

ГИС-платформы (Micromine, Surpac) позволяют оптимизировать разработку, снизить потери с 5 до 2–3 %. Система «Цифра. Карьер» (ВИСТ-А) – отечественная разработка; прирост производительности – 15–20 %. Геотехнический мониторинг мерзлоты (система «Эталон») критичен на Северо-Востоке; прогнозирует обрушения на 30–40 % раньше. ГНСС мониторинг борта: точность – 1–3 см/год. Автономизация: тестируется на Наталкинском; прогноз внедрения – 2026–2027 года.

На основе комплексного анализа ранее рассмотренных частных параметров выполнена интегральная оценка технологического уровня и эффективности применяемых решений для каждого из объектов исследования [7, 14–15].

С использованием метода экспертных оценок и сравнительного анализа ключевых технико-экономических индикаторов (КПИ) проведено ранжирование месторождений по степени технологической зрелости, структуре транспортных

Таблица 6 / Table 6

**Параметры дробильносортировочных заводов и обогащения /
Crushing, Screening, and Beneficiation Parameters**

Характеристика / Characteristic	Наталкинское / Natalinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Проектная мощность, млн т/год / Design capacity (million t/year)	15–20	8–10	5–7	13	0,8–1,5
Первичная дробилка / Primary crusher	Щековая Sandvik / Jaw Sandvik	Щековая / Jaw	Щековая / Jaw	Конусная Metso HP500 / Cone Metso HP500	Щековая / Jaw
Производительность первичной дробилки, т/ч / Primary capacity (t/h)	500–600	250–300	150–200	350–400	100–120
Вторичная дробилка / Secondary crusher	Конусная / Cone	Конусная Metso / Cone Metso	Не применяется / Not used	Конусная HP200 / Cone HP200	Конусная / Cone
Грохотно-сортировочный комплекс / Screening complex	Палубные грохоты / Deck screens	Трехпалубный / Three-deck	Двухпалубный / Two-deck	Четырехпалубный / Four-deck	Двухпалубный / Two-deck
Число рассевочных палуб / Number of screen decks	3–4	3	2	4	2
Тип обогащения / Beneficiation type	Гравитация + флотация / Gravity + flotation	Гравитация / Gravity	Гравитация / Gravity	Флотация / Flotation	Флотация / Flotation
Степень извлечения Au, % / Au recovery (%)	75–85	70–80	65–80	85–92	85–95
Хвостовое хозяйство, млн т / Tailings facility (million t)	50–100	25–50	10–20	120–180	1–3

схем и сложности процессов обогащения. Внимание уделено сопоставлению уровней цифровизации производства, удельной себестоимости добычи (AISC), показателей возврата инвестиций (ROI) и общей степени готовности объектов к плановому периоду 2025 года, что позволяет сформировать целостную картину конкурентоспособности проектов в текущих рыночных условиях.

Итоговые результаты синтеза представлены в таблице 8, где обобщены качественные и количественные метрики эффективности производственных систем пяти месторождений, выявляющие лидеров по технологическому развитию и объекты с высоким потенциалом оптимизации.

Исходя из анализа (табл. 8) можем утверждать, что Наталкинское – флагманский проект, готовность – 95 %, се-

бестоимость – 650–750 USD/oz благодаря масштабу. Павлик – стабильный, себестоимость на 50–100 USD/oz выше. Хаканджинское – развивающийся проект, уровень цифровизации – 50–60 %; потенциал снижения себестоимости на 100–150 USD/oz. Култуминское – стратегически важный из-за комплексности (медь как основной доход); себестоимость сбалансирована. Вернинское – консервированное; потенциал реактивации при цене >\$2000/oz.

Обсуждение

1. Проведенный сравнительный анализ показывает, что ключевым фактором, дифференцирующим российские проекты от мировых аналогов (Nevada Gold Mines в США или Super Pit в Австралии), является необходимость работы в

Таблица 7 / Table 7

Системы цифровизации, управления и мониторинга / Digitalization, Management, and Monitoring Systems

Компонент / Component	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
ГИС-платформа / GIS platform	Micromine	Micromine	Surpac	Micromine + Vulcan	Surpac
Разрешение ГИС, м / GIS resolution (m)	10 × 10	20 × 20	25 × 25	10 × 10	50 × 50
Система диспетчеризации / Dispatch system	«Цифра.Карьер» + Wenco / Digital.Mine + Wenco	«Цифра.Карьер» / Digital.Mine	Wenco Fleet	Wenco Fleet	Базовая / Basic
Кол-во объектов GPS / GPS objects	25–35	15–20	10–15	15–20	3–5
Прирост производительности, % / Productivity increase (%)	15–20	12–18	10–15	18–22	5–8
Геотехнический мониторинг / Geotechnical monitoring	«Эталон» (Ростех) / Etalon (Rostec)	«Эталон», базовая / Etalon basic	ГНСС рефлексоры / GNSS reflectors	Геоакустика / Geoacoustics	Тахеометрия / Tacheometry
Точность ГНСС, см/год / GNSS accuracy (cm/year)	1–2	2–3	2–3	1–2	3–5
Температурные датчики мерзлоты, шт. / Permafrost temperature sensors (units)	50–80	20–30	10–15	0	0
Система оповещения / Alert system	Автоматическая, SMS/e-mail / Automatic SMS/e-mail	Электронный журнал / Electronic log	Сирена + e-mail / Siren+e-mail	Планируется / Planned	Устное / Verbal
Автономные системы / Autonomous systems	Тестирование / Testing	Планируется / Planned	Перспектива / Prospective	«Пилот-2025» / Pilot 2025	Не планируется / Not planned

Таблица 8 / Table 8

Синтетическая оценка технологических решений по объектам / Synthetic Assessment of Technological Solutions by Sites

Характеристика / Characteristic	Наталкинское / Natalkinskoe	Павлик / Pavlik	Хаканджинское / Khakandzhinskoe	Култуминское / Kultuminskoe	Вернинское / Verninskoe
Технологический уровень (1–5) / Technological level (1–5)	4,5	4,0	3,5	4,5	3,0
Преобладающий транспорт / Dominant transport	EAT 80 % + ECT 20 %	EAT 100 %	EAT 100 %	ECT 80 %+ EAT 20 %	EAT 100 %
Обогащение сложность / Beneficiation complexity	Среднее / Medium	Среднее / Medium	Низкое / Low	Высокое / High	Высокое / High
Уровень цифровизации, % / Digitalization level (%)	85–90	70–75	50–60	75–80	40–50
Себестоимость Au, USD/oz / Au production cost (USD/oz)	650–750	700–800	800–900	550–650	600–700
ROI (лет) / ROI (years)	3–4	4–5	5–6	4–5	3–4
Готовность к 2025 году, % / Readiness to 2025 (%)	95	85	75	70	60

условиях сплошной многолетней мерзлоты. Как видно из таблицы 2, для месторождений Северо-Востока (Наталкинское, Павлик) и Забайкалья (Култуминское) критическим становится управление тепловым режимом горного массива. В отличие от канадских проектов, где часто применяется сезонная консервация, российские ГОКи реализуют стратегию круглогодичной интенсивной отработки с применением принудительного оттаивания и буферного складирования руды. Это подтверждается данными таблицы 3: сезонность БВР для ряда объектов нивелируется за счет опережающей подготовки блоков.

2. Результаты, представленные в таблице 7, демонстрируют прямую корреляцию между уровнем цифровизации и операционной эффективностью. Внедрение отечественных систем диспетчеризации («Цифра. Карьер» / ВИСТ-А) на Наталкинском и Павлике позволило повысить КИО (коэффициент использования оборудования) до 0,85–0,90, что на 10–12 % выше показателей, характерных для аналогового управления. При этом переход к «Интеллектуальному карьеру 2.0» (Smart Mine) пока сдерживается не технологическими барьерами, а необходимостью адаптации алгоритмов к непредсказуемым погодным условиям, когда датчики и лидары требуют специальных систем очистки и обогрева.

3. Анализ схем обогащения (табл. 6) выявляет тренд на усложнение минерально-сырьевой базы. Если Вернинское и Хаканджинское эффективно работают на традиционных схемах, то запуск Култуминского месторождения с 2025 года знаменует переход к комплексной переработке полиметаллических руд (Au-Cu-Fe). Это требует от операторов гибкости технологических регламентов и внедрения комбинированных схем (гравитация + флотация + гидрометаллургия).

Заключение

В результате выполненного исследования технологий открытой отработки пяти крупнейших золоторудных месторождений России (Наталкинское, Павлик, Хаканджинское, Култуминское, Вернинское) сформулированы следующие выводы:

1. Унификация технологических решений. К 2025 году на ведущих объектах сформировался единый технологический стандарт: использование экскаваторов большой единичной мощности (ковш 20–35 м³), автосамосвалов грузоподъемностью 180–220 т и внедрение элементов циклично-поточной технологии для глубоких горизонтов. Данная унификация позволяет снизить операционные затраты на 15–20 % за счет оптимизации сервисного обслуживания.

2. Адаптивность к экстремальным условиям. Ключевой компетенцией российских горных компаний стала интеграция систем геотехнического мониторинга (радары, термометрия) непосредственно в производственный цикл. Это позволяет вести безопасную отработку карьеров глубиной более 400 м в условиях высокой сейсмичности (до 7–8 баллов) и деградации мерзлоты.

3. Экономическая устойчивость. Финансовый анализ показал, что, несмотря на высокую себестоимость добычи в северных регионах (AISC 800–1100 USD/oz), проекты сохраняют инвестиционную привлекательность (IRR 18–35 %) благодаря эффекту масштаба и высоким содержаниям полезного компонента в руде (1,5–3,0 г/т).

4. Вектор развития. Основным направлением развития до 2030 года станет переход от автоматизации отдельных процессов к созданию полностью роботизированных участков добычи и внедрению искусственного интеллекта для управления рудопотоками в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Миккельсен Е.А. Сравнительный анализ добычи драгоценных металлов в муниципальных округах Магаданской области в 2022–2024 годах. *Московский экономический журнал*. 2025; 4: 367–385. https://doi.org/10.55186/2413046X_2025_10_4_116.
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Mikkelsen E.A. Comparative analysis of precious metal mining in municipal districts of the Magadan Region in 2022–2024. *Moscow Economic Journal*. 2025; (4): 367385. (In Russ.). https://doi.org/10.55186/2413046X_2025_10_4_116.
2. Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Долбин И.Д. Анализ и моделирование влияния климатических изменений на территории Северо-Востока на стабильность и деформации геодезических сетей и инженерных сооружений. *Маркиейдерия и недропользование*. 2025; 25 (6): 72–77. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-72-77>.
Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Dolbin I.D. Analysis and modeling of the impact of climatic changes in the North-East territory on the stability and deformation of geodetic networks and engineering structures. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025; 25 (6): 72–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-6-72-77>.
3. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А., Кадочников М.В. Применение искусственного интеллекта и перспективы развития аналитических систем больших данных в горной промышленности. *Горная промышленность*. 2022; 3: 89–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92>.
Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Makeev M.A., Kadochnikov M.V. Application of artificial intelligence and development prospects of big data analytical systems in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2022; (3): 89–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92>.
4. Соколов И.В. Результаты геотехнологических и геомеханических исследований, направленных на повышение безопасности и эффективности горного производства. *Горная промышленность*. 2025; 4S: 127–133. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-127-133>.
Sokolov I.V. Results of geotechnological and geomechanical studies aimed at improving the safety and efficiency of mining production. *Russian Mining Industry*. 2025; (4S): 127–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-127-133>.
5. Яковлев В.Л., Глебов А.В., Журавлев А.Г. и др. Методологические аспекты переходных процессов при формировании горнотехнических систем глубоких карьеров. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024; 6: 85–97. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240610>.
Yakovlev V.L., Glebov A.V., Zhuravlev A.G., et al. Methodological aspects of transient processes in the formation of mining engineering systems of deep open pits. *Journal of Mining Science*. 2024; (6): 85–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRI20240610>.
6. Федянин А.С., Зотеев О.В. Методика оценки геотехнических рисков горнодобывающих предприятий. *Горный журнал*. 2024; 1: 9–14. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.02>.

- Fedyanin A.S., Zoteev O.V. Methodology for assessing geotechnical risks of mining enterprises. *Mining Journal*. 2024; (1): 9-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.02>.
7. Темкин И.О., Клебанов Д.А., Дерябин С.А., Конов И.С. Построение интеллектуальной геоинформационной системы горного предприятия с использованием методов прогнозной аналитики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 3: 114-125. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125>.
Temkin I.O., Klebanov D.A., Deryabin S.A., Konov I.S. Building of intelligent geoinformation system for mining plant using predictive analytics methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020; (3): 114-125. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125>.
 8. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *Записки Горного института*. 2023; 259: 95-111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., et al. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023; 259: 95-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
 9. Бабелло В.А., Лизункин М.В., Смолич С.В., Кондрашова Е.К. Геомеханическая оценка устойчивости бортов карьеров на месторождениях Забайкальского края. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2025; 1: 57-64. <https://doi.org/10.15372/FTPR-PI20250105>.
Babello V.A., Lizunkin M.V., Smolich S.V., Kondrashova E.K. Geomechanical assessment of pit wall stability at deposits in the Transbaikalian Territory. *Journal of Mining Science*. 2025; (1): 57-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20250105>.
 10. Belay H., et al. Open pit design for improved gold recovery at Ula-Ulo placer gold deposit. *Scientific Reports*. 2025; 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13512-3>.
 11. Wang Y. Advancing mining technology for enhanced production and sustainability: A review of recent developments. *Journal of Advanced Mining Engineering*. 2024; 2 (1). <https://doi.org/10.1016/j.jame.2024.000053>.
 12. Hassan M., et al. Deep learning and IoT enabled digital twin framework for monitoring open-pit coal mines. *Frontiers in Energy Research*. 2023; 11: 1265111. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1265111>.
 13. Ercelebi S.G., Bascetin A. Deep Reinforcement Learning based real-time open-pit mining truck dispatching system. *Omega*. 2024; 124: 103001. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2024.103001>.
 14. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Энергетические аспекты освоения рудных месторождений Сибири и Дальнего Востока. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021; 13 (3): 345-355.
Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Energy aspects of developing ore deposits in Siberia and the Far East. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021; 13 (3): 345-355. (In Russ.).
 15. Козырев А.А. Геомеханическое обоснование ведения горных работ на удароопасных рудных месторождениях. *Горная промышленность*. 2023; S1: 4-13. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-04-13>.
Kozyrev A.A. Geomechanical substantiation of mining operations at shock-prone ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2023; S1: 4-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-04-13>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вероника Владимировна Арно –

доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

Ева Павловна Колесниченко –

студентка направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит», ВШГА МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

Ирина Юрьевна Гарифулина –

канд. техн. наук, доцент кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация

Евгений Сергеевич Семькин –

старший преподаватель кафедры геологии и горного дела, Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация

Никита Андреевич Ремизов –

студент направления подготовки «Горное дело», Северо-Восточный государственный университет (Политехнический институт), г. Магадан, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

Veronika V. Arno –

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Geology and Mining, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: vvnika@mail.ru

Eva P. Kolesnichenko –

Student of the Field of Training "State and Municipal Audit", Higher School of Economics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Irina Yu. Garifulina –

PhD, Associate Professor, Department of Geology and Mining, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation

Evgeniy S. Semykin –

Senior Lecturer at the Department of Geology and Mining, North-Eastern State University (Polytechnic Institute), Magadan, Russian Federation

Nikita A. Remizov –

student of the Mining Department, North-Eastern State University Polytechnic Institute, Magadan

Критерии авторства:

В. В. Арно, И. Ю. Гарифулина – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы; Е. С. Семькин – оценка результатов и коррекция написанной работы; Е. П. Колесниченко, Н. А. Ремизов – выборка и сбор материала для исследований.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.02.2026

Поступила после рецензирования: 06.03.2026

Принята к публикации: 19.03.2026

Contribution:

V. V. Arno, I. Yu. Garifulina – research concept, formulation of the conflict between the current paradigm and new facts, drafting the manuscript; E. S. Semykin – evaluation of results and revision of the manuscript; E. P. Kolesnichenko, N. A. Remizov – data sampling and collection for the research.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 05.02.2026

Revised: 06.03.2026

Accepted: 19.03.2026