

Роботизация буровзрывных работ на открытых горных работах: автоматизация технологического цикла, точность бурения и управление качеством взрывной подготовки горной массы

И.В. Самарин ✉

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

✉ ivs@gubkin.ru

Резюме: Буровзрывные работы – базовый передел открытых горных работ, определяющий гранулометрический состав горной массы и через него издержки экскавации, транспортирования и переработки; на отбойку приходится 20–35% себестоимости добычи, а буровзрывным способом отбивают до 90% скального объема. Ручные операции порождают разброс точности бурения, перерасход взрывчатых веществ, повышенный выход негабарита, сейсмику и риски для персонала. В статье систематизированы направления роботизации буровзрывных работ по пяти технологическим переделам – бурение, проектирование сетки и паспорта, зарядание, взрывание, диагностика дробления – и введена единая пятиуровневая шкала зрелости автоматизации (ручной → механизированный → автоматизированный → роботизированный → автономный). Предложен интегральный показатель эффективности роботизации с весами переделов, нормированными по их вкладу в эффекты. Прогноз гранулометрии выполнен по модели Кузнецова–Раммлера и функции Свебрека; на модельном блоке (диаметр скважин 250 мм) показано смещение медианы куска с 420 до 350 мм и снижение выхода негабарита с 7,8 до 2,9%. Обобщены отраслевые эффекты автоматизации: сокращение отклонения скважин на 50–75%, негабарита – на 40–65%, удельного расхода взрывчатых веществ – на 5–12%, рост производительности бурения на 10–20%, снижение сейсмики на 15–30%. Матрица «передел × эффект» ранжирует вклад переделов, а роботизация опасных операций зарядания и бурения снижает травматизм, убирая персонал с взрывающего блока. Для типового и целевого сценариев интегральный показатель составил 56 и 88%. Обозначены барьеры внедрения и дорожная карта роботизации буровзрывных работ в контуре автоматизированной системы управления технологическим процессом и цифрового двойника карьера.

Ключевые слова: буровзрывные работы, открытые горные работы, роботизация, автономный буровой станок, точность бурения, гранулометрический состав, модель Кузнецова–Раммлера, функция Свебрека, электронное инициирование, удельный расход взрывчатых веществ, выход негабарита, цифровой двойник карьера

Для цитирования: Самарин И.В. Роботизация буровзрывных работ на открытых горных работах: автоматизация технологического цикла, точность бурения и управление качеством взрывной подготовки горной массы. *Горная промышленность*. 2026;(5):127–134. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-127-134>

Autonomous drilling and blasting operations in open-pit mining: automation of the process cycle, drilling accuracy and management of blast fragmentation of rocks

I.V. Samarin ✉

National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation

✉ ivs@gubkin.ru

Abstract: Drilling and blasting is a basic stage of open-pit mining that governs the particle-size distribution in the muck pile and, consequently, the costs of excavation, haulage and processing. Blasting accounts for 20–35% of the mining cost and up to 90% of the rock breaking by volume. Manual operations cause drilling inaccuracy, excessive consumption of explosives, an increased

oversize yield, higher seismicity and risks to personnel. The paper systematizes directions of drilling and blasting robotization across the following five process stages: drilling, pattern and charge design, charging, initiation and fragmentation diagnostics. It also introduces a unified five-level automation-maturity scale, i.e. manual → mechanized → automated → robotic → autonomous operations. An integral robotization efficiency index is proposed, with process weights normalized by their contribution to the effects. Fragmentation forecast is made using the Kuznetsov–Rammler model and the Swebrec function. The median fragment size shifts from 420 to 350 mm and the oversize yield drops from 7.8 to 2.9% for a model block (250 mm hole diameter). Industry effects of automation are generalized including a 50–75% reduction in the hole deviation, a 40–65% drop in oversize, a 5–12% decrease in the specific explosive consumption, a 10–20% gain in the drilling productivity and a 15–30% reduction in seismicity. In the typical and target scenarios the integral index equals 56% and 88%. Implementation barriers and a roadmap for drilling and blasting robotization within the process-control system and the digital twin of the pit are outlined.

Keywords: drilling and blasting, open-pit mining, robotization, autonomous drill rig, drilling accuracy, particle size distribution, Kuznetsov–Rammler model, Swebrec function, electronic initiation, specific explosive consumption, oversize yield, digital twin of open-pit mine

For citation: Samarin I.V. Autonomous drilling and blasting operations in open-pit mining: automation of the process cycle, drilling accuracy and management of blast fragmentation of rocks. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):127–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-127-134>

Введение

Буровзрывные работы (БВР) – базовый, «нулевой» предел открытых горных работ: именно взрыв формирует гранулометрический состав горной массы, от которого зависит вся последующая цепочка «экскавация → транспорт → дробление → переработка». На открытых работах буровзрывным способом отбивают до 90% скального объёма [1], а доля затрат на отбойку в себестоимости добычи в зависимости от крепости пород достигает 20–35% [2]. Качество взрыва предопределяет и издержки смежных переделов: рост средневзвешенного куска взорванной массы с 350 до 550 мм снижает производительность карьерного экскаватора (на примере WK-35 в паре с автосамосвалом CAT 793D) в 1,5 раза – с 15000 до 8500 м³ за смену, а доля некондиционных кусков крупнее 1 м³ растёт с 3,5 до 8% [3]. Отсюда логика mine-to-mill: параметры БВР следует оптимизировать не по локальной стоимости бурения и взрывчатых веществ (ВВ), а по интегральной стоимости всего цикла [4].

Ручная и полумеханизированная организация БВР – источник системной вариативности. Ошибки ручной разметки и наведения станка дают разброс глубины и наклона скважин, недобур и перебур, смещение фактической сетки от проектной; результат – перерасход ВВ, локальные зоны переизмельчения и одновременно выход негабарита (нормативно 1–5% [2]), повышенная сейсмика и риск для персонала на заряжаемом блоке. Именно эти потери и адресует роботизация.

Механизм влияния прозрачен: недобур оставляет в подошве уступа порог и «стаканы», перебур увеличивает переизмельчение и расход ВВ, а смещение скважины от проектной сетки нарушает взаимодействие соседних зарядов и рождает локальный негабарит. Поскольку энергозатраты на дробление и измельчение руды на фабрике монотонно растут с крупностью питания, «недоработанный» взрыв оплачивается дважды – на экскавации и в переработке [2; 4]. Спутниковые (GNSS) и инерциальные системы навигации станка, автоматическое выдерживание глубины и угла и контроль недобура/перебура снимают эту вариативность в самом источнике [5; 6].

Направления роботизации БВР складываются в пять переделов. Первый – бурение: переход к автономным и дистанционно управляемым станкам с высокоточным

позиционированием (спутниковым и инерциальным), интеллектуальной адаптацией режима к крепости массива и автоматическим контролем недобура / перебура [5; 6]. Роботизация бурения и транспорта уже снижает травматизм и убирает человека с опасного уступа [7; 8]. Второй – проектирование: САПР БВР автоматически строит сетку скважин и паспорт заряжания по 3D-модели блока и данным о трещиноватости, увязывая их с прогнозом дробления [9]. Третий – зарядание: смесительно-зарядные машины с элементами автоматизации и дистанционного управления и применение эмульсионных ВВ [10]. Четвёртый – взрывание: электронные системы инициирования с программируемым замедлением; точность отработки интервала у них 0,02% против до 20% у неэлектрических средств, что позволяет управлять сейсмикой и расширять сетку, снижая удельный расход [11; 12]. Пятый – диагностика дробления: машинное зрение и нейросети (архитектуры типа U-Net), оценивающие кусковатость в реальном времени и удерживающие негабарит на уровне не более 3% [13; 14].

Сквозной слой – цифровое моделирование взрыва и прогноз гранулометрии. Классической основой служит модель Кузнецова–Раммлера [9; 15; 16], расширяемая функцией Сwebрека, которая тремя параметрами описывает распределение с коэффициентом детерминации выше 0,995 [17]; современные работы соединяют эмпирические модели с цифровой обработкой изображений – WipFrag, Split-Desktop [18] – и вероятностными распределениями Вейбулла [19]. Всё это интегрируется в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) горного производства, «цифровой рудник» и цифровые двойники технологических комплексов [8; 20; 21].

Несмотря на обилие частных решений, в литературе нет единой шкалы зрелости роботизации именно БВР и интегрального критерия, сводящего разнородные эффекты переделов. Цель работы – систематизировать уровни автоматизации БВР по переделам, предложить интегральный показатель эффективности роботизации и на модельном примере показать сдвиг гранулометрии и ключевых показателей при переходе от ручных БВР к автоматизированным.

Материалы и методы

Информационную базу составили 21 рецензируемая публикация (BAK / RSCI / Scopus) 2017–2025 гг. по автоматизации и роботизации БВР, автономным буровым станкам, цифровому проектированию и моделированию взрыва, АСУ ТП горного производства, а также отраслевые данные опытно-промышленной эксплуатации. Методический аппарат включает три компонента.

Первый – пятиуровневая шкала зрелости автоматизации, применяемая единообразно к каждому из пяти переделов БВР (бурение, проектирование, зарядание, взрывание, диагностика дробления): уровень 1 – ручной, 2 – механизированный, 3 – автоматизированный, 4 – роботизированный, 5 – автономный (табл. 1). Признак уровня – доля функций, выполняемых без участия оператора, и наличие обратной связи по данным.

Второй – интегральный показатель эффективности роботизации БВР, сводящий уровни переделов с весами:

$$I_{роб} = (\sum w_i \cdot L_i) / (5 \cdot \sum w_i) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где L_i – уровень автоматизации i -го передела (от 1 до 5); w_i – вес передела; 5 – максимальный уровень шкалы. Суммирование ведётся по пяти переделам. Веса приняты пропорциональными суммарному вкладу передела в эффекты – нормированным суммам строк матрицы «передел × эффект» (табл. 5): $w = \{0,21; 0,21; 0,18; 0,20; 0,20\}$. Показатель нормирован на 100% и допускает сравнение объектов и сценариев (расчёт авторов)

Третий – прогноз гранулометрии. Медианный размер куска оценивается по формуле Кузнецова:

$$x_{50} = A \cdot q^{-0,8} \cdot Q_3(1/6) \cdot (115 / e)^{0,633}, \quad (2)$$

где A – порода-фактор (индекс взрываемости), 7–13; q – удельный расход ВВ, кг/м³; Q_3 – масса заряда в скважине, кг; e – относительная работоспособность ВВ (для граммонита/ANFO $e = 100$).

Суммарный выход по крупности описывается распределением Розина–Рамлера, а «хвосты» и связь с дроблением уточняются функцией Свебрека:

$$P(x) = 1 - \exp[-\ln 2 \cdot (x / x_{50})^n];$$

$$P_{св}(x) = 1 / (1 + [\ln(x_{\max}/x) / \ln(x_{\max}/x_{50})]^b), \quad (3)$$

где $P(x)$ – суммарный проход по крупности, доля; x – размер куска, мм; n – индекс равномерности дробления; $x_{\max}$ – максимальный размер куска, мм; b – параметр волнистости функции Свебрека. Выход негабарита вычисляется как $1 - P(x_n)$ при пороге $x_n = 1000$ мм.

Модельный (демонстрационный) блок для расчётного примера: скальные породы средней крепости, диаметр скважин 250 мм, эмульсионное ВВ. Сравниваются два сценария – «ручные БВР» и «после автоматизации»; варьируются сетка, удельный расход и отклонение скважин (табл. 4). Все величины расчётного примера получены моделированием и помечены как расчёт авторов; отраслевые эффекты (табл. 3) приведены диапазонами со ссылкой на источники. Значения n и b приняты в характерных для карьеров пределах [15–17; 19].

Результаты

Систематизация уровней (табл. 1) показывает, что по БВР большинство отечественных карьеров находятся между уровнями 2 и 3: бурение и зарядание механизированы, проектирование частично автоматизировано, а взрывание и диагностика дробления автоматизированы фрагментарно. Полностью автономный режим (уровень 5) сегодня реализуется преимущественно на буровом переделе – в опытно-промышленной эксплуатации автономных станков с высокоточным позиционированием, где наведение става доводится до дециметрового уровня, а горизонтирование мачты – примерно до одного градуса [5; 8].

Сопоставление конкретных технологий (табл. 2) выявляет разную зрелость: автономные буровые станки и САПР БВР достигли промышленного внедрения, электронное иницирование и смесительно-зарядная техника – тиражирования, тогда как сквозное цифровое моделирование взрыва и нейросетевая диагностика гранулометрии пока находятся на стадии опытно-промышленной эксплуатации [9–11; 13–14].

Прогноз гранулометрии по (2)–(3) для модельного блока даёт наглядную картину сдвига распределения (рис. 1). При ручных БВР расчётная медиана $x_{50} = 420$ мм,

Таблица 1
Уровни автоматизации и роботизации буровзрывных работ по технологическим переделам

Table 1
Automation and robotization maturity levels of drilling and blasting operations by the processes stage

Уровень	Определение и признак	Человек в контуре	Типичные средства
1	Ручной: разметка, наведение и контроль вручную	Полностью	Рулетка, визирная разметка
2	Механизированный: машины с ручным управлением	Постоянно	Буровой станок, смесительно-зарядная машина, локальная контрольно-измерительная система
3	Автоматизированный: автоматизация операций, оператор надзирает	Надзор	САПР БВР, GNSS-навигация станка
4	Роботизированный: дистанционное / полуавтономное ведение	Дистанционно	Телеуправление, автозарядание
5	Автономный: самостоятельная работа с обратной связью	Вне контура	Автономный станок, цифровой двойник

Систематизация выполнена по [5–11; 20].
The classification is based on [5–11; 20].

Таблица 2
Сопоставление технологий и средств роботизации
буровзрывных работ

Технология	Функция в цикле БВР	Точность / ключевой эффект	Интеграция с АСУ ТП	Зрелость
Автономный буровой станок	Высокоточное бурение сетки	Наведение ~0,1 м; контроль недобура	Высокая	Внедрение
САПР БВР	Проект сетки и паспорта заряжания	Сетка и заряд по 3D-модели блока	Высокая	Внедрение
Цифровое моделирование взрыва	Прогноз гранулометрии	Кузнецова–Раммлера / Свебрека, $R^2 > 0,995$	Средняя	Опытно-промышленная эксплуатация
Смесительно-зарядная техника	Механизир. и дистанц. заряжание	Дозирование эмульсионных взрывчатых веществ, дистанционный пуск	Средняя	Тиражирование
Электронное инициирование	Управление замедлениями	Точность 0,02%; шаг 1 мс	Высокая	Тиражирование
Машинное зрение / нейросети	Диагностика кусковатости	Негабарит $\leq 3\%$ онлайн (U-Net)	Средняя	Опытно-промышленная эксплуатация

Обобщено авторами по [5; 9–11; 13; 14; 17].
Summarized by the authors based on [5; 9–11; 13; 14; 17].

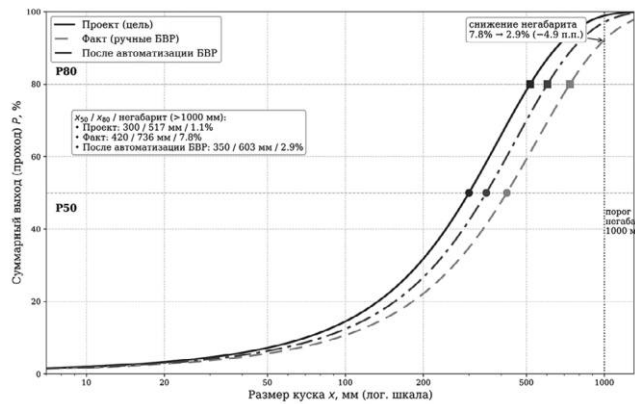


Рис. 1
Кумулятивные кривые
гранулометрического состава
взорванной горной массы
(Кузнецова–Раммлера/
Свебрека): проект, факт,
после автоматизации;
отметки P50/P80 и порог
негабарита

Fig. 1
Cumulative particle size
distribution curves of the
rocks in the muck pile
(Kuznetsov–Rammler/
Swebrec): design, actual,
upon introduction of
automation; P50/P80 marks
and the oversize threshold
level

Таблица 3
Экономико-технологические эффекты направлений
автоматизации буровзрывных работ

Направление	Показатель	Эффект, диапазон	Обобщено по источникам, n
Высокоточное бурение	Отклонение скважин	-50...-75%	$n = 3$ [5; 6; 8]
Проектирование и инициирование	Удельный расход ВВ	-5...-12%	$n = 3$ [1; 11; 12]
Управление дроблением	Выход негабарита	-40...-65%	$n = 4$ [3; 13–15]
Автономное бурение	Производительность бурения	+10...+20%	$n = 2$ [5; 8]
Электронное инициирование	Сейсмика (PPV)	-15...-30%	$n = 2$ [11; 12]
Роботизация опасных операций	Травматизм персонала	Существенно ↓	$n = 2$ [7; 8]
Комплекс роботизации БВР	Окупаемость	18–36 мес.	Расчёт авторов [8; 21]

Примечание: диапазоны обобщены по указанным источникам; n – число обобщённых публикаций; окупаемость – оценка авторов по отраслевым данным.
Note: the ranges are summarized based on the cited sources; n represents the number of publications summarized; the payback period is the authors' estimate based on the industry data.

Table 2
Comparison of robotization technologies and
tools for drilling and blasting operations

$x_{80} = 736$ мм, выход негабарита (>1000 мм) – 7,8%; переход к автоматизированному контуру (уплотнение и выравнивание сетки, снижение отклонения скважин, корректировка замедлений) смещает кривую влево: $x_{50} = 350$ мм, $x_{80} = 603$ мм, негабарит – 2,9%, приближаясь к проектной кривой ($x_{50} = 300$ мм, негабарит 1,1%). Автоматизация «съедает» около 4,9 процентного пункта негабарита – эффект, прямо конвертируемый в производительность экскавации [3].

Обобщённые по литературе и отраслевым данным эффекты сведены в табл. 3. Наибольший разброс – по точности бурения (сокращение отклонения скважин на 50–75%) и негабариту (снижение на 40–65%); удельный расход ВВ снижается умеренно (5–12%), но с мультипликативным эффектом ниже по цепочке; производительность бурения растёт на 10–20%, сейсмика снижается на 15–30% [3; 8; 11; 13; 14]. Пересчёт на экскавацию показателен: по зависимости [3], сокращение средневзвешенного куска в модели с 420 до 350 мм возвращает один-два «ковшовых» цикла и заметно повышает сменную производительность погрузки, тогда как обратный дрейф к 500–550 мм обрушает её в полтора раза.

Table 3
Technological and economic effects of various directions in
automation of the drilling and blasting operations

Таблица 4
Параметры расчётного
примера прогноза
гранулометрического состава
(модельный расчёт)

Параметр	До: ручные БВР	После автоматизации
Диаметр скважин, мм	250	250
Сетка (a × b), м	7,0 × 7,0	6,5 × 7,0
Удельный расход q, кг/м ³	0,82	0,74
Отклонение скважин, м	0,45	0,12
Медиана x ₅₀ (P50), мм	420	350
x ₈₀ (P80), мм	736	603
Выход негабарита >1000 мм, %	7,8	2,9

Примечание: расчёт по формулам (2)–(3) для модельного блока; удельный расход снижен при одновременном выравнивании сетки и уменьшении отклонения скважин.
Note: the calculation uses equations (2)–(3) for the model block; the specific consumption is reduced with simultaneous grid alignment and a decrease in the borehole deviation.

Таблица 5
Матрица «передел БВР × эффект автоматизации», баллы 0–5

Передел	Точность / качество	Расход БВ	Безопасность / сейсмика	Производительность	Себестоимость	Всего
Бурение	5	3	4	5	4	21
Проектирование	4	5	3	4	5	21
Заряжание	3	4	5	3	3	18
Взрывание	4	4	5	3	4	20
Диагностика дробления	5	4	3	4	4	20
Итого по эффекту	21	20	20	19	20	100

Примечание: экспертная балльная оценка авторов (0 – влияния нет, 5 – максимальное); суммы строк использованы как веса w_i в формуле (1).
Note: an expert scoring of the authors (0 = no impact, 5 = maximum impact); the totals of the rows are used as the w_i weights in Equation (1).

Параметры модельного примера (табл. 4) и сравнение показателей «до/после» (рис. 2) конкретизируют эти диапазоны. Отклонение скважин в модели снижено с 0,45 до 0,12 м (–73%), удельный расход – с 0,82 до 0,74 кг/м³ (–10%), негабарит – с 8,0 до 3,0% (–62%), производительность бурения повышена на 18%, относительная сейсмика (PPV) снижена на 22%. Разнонаправленность показателей (для одних «лучше» – меньше, для производительности – больше) подчёркивает необходимость сводного критерия.

Матрица «передел × эффект» (табл. 5, рис. 3) ранжирует вклад переделов. Наибольшую суммарную значимость набирают бурение и проектирование (по 21 баллу из 25): точность позиционирования и оптимизация сетки/паспорта влияют сразу на качество, расход БВ, производительность и себестоимость. Заряжание сильнее всего сказывается на безопасности (роботизация убирает персонал с блока [7]), взрывание – на сейсмике и качестве через электронное инициирование [11; 12], а диагностика дробления замыкает контур обратной связи, обеспечивая точность управления [13; 14].

Подстановка нормированных весов и характерных уровней в выражение (1) даёт интегральный показатель: для типичного карьера (уровни переделов 3-3-2-3-3) I_{роб} ≈ 56%,

Table 4
Parameters for an example
calculation of the particle size
distribution (a model analysis)

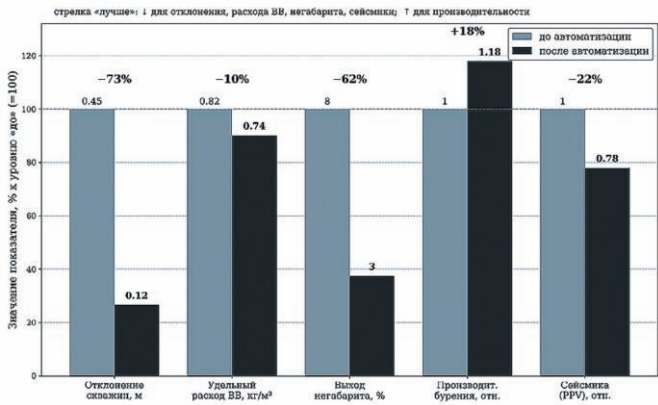


Рис. 2
Эффекты автоматизации БВР:
показатели «до/после»
(нормировка к уровню
«до» = 100), с подписью
процента изменения

Fig. 2
Effects of blasting automation:
the 'before/after' KPIs
(normalized to the 'before'
level = 100), with the
percentage-change labels

Table 5
The 'drilling-and-blasting stage × automation effect' matrix, scores 0–5

Таблица 6
Барьеры и факторы
внедрения роботизации
буровзрывных работ

Группа	Барьер / фактор	Влияние
Технологические	Разнородность парка станков и БВ; надёжность связи на уступе	Среднее
Экономические	Высокие капвложения; окупаемость 18–36 мес	Высокое
Кадровые	Дефицит операторов роботизированных комплексов	Среднее
Нормативно-правовые	Нет регламентов для автономной техники в опасной зоне	Высокое
Данные и ИТ	Качество и связность данных для АСУ ТП и цифрового двойника	Высокое

Примечание: систематизация авторов по [7; 8; 20; 21]; «влияние» – экспертная качественная оценка сдерживающего фактора.
Note: classification of the authors based on [7; 8; 20; 21]; 'impact' is an expert qualitative assessment of a constraining factor.

Table 6
Barriers and drivers
for adopting autonomous
drilling and blasting
operations

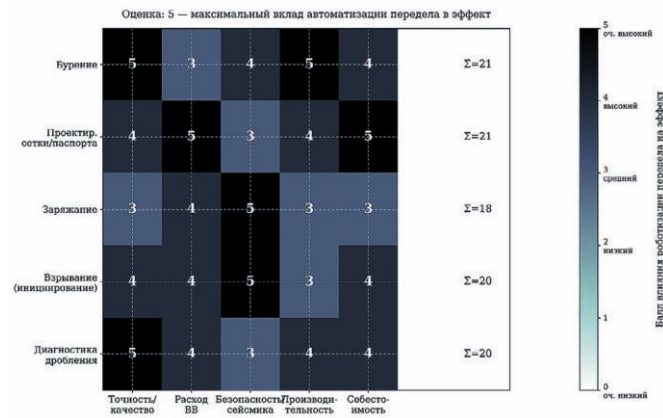


Рис. 3
Тепловая карта «передел БВР × эффект автоматизации» (баллы 0–5) с суммами по строкам

Fig. 3
A heat map of the blasting stage × automation effect (scores 0–5) with the row totals

а для целевого роботизированного сценария (5-5-4-4-4) – $I_{роб} \approx 88\%$ (расчёт авторов). Разрыв около 32 процентных пунктов локализует резерв: наибольший прирост даёт подтягивание заряжания (с уровня 2 до 4) и перевод бурения и проектирования в автономный режим.

Барьеры внедрения (табл. 6) остаются преимущественно внесистемными по отношению к самой технике. Ключевые – экономические (капиталоёмкость, окупаемость 18–36 мес), кадровые и нормативные (отсутствие регламентов для автономной техники в опасной зоне), а также «данные»: качество и связность данных бурения, взрыва и диагностики определяют работоспособность цифровых двойников и АСУ ТП [20; 21].

Отмечается, что на низких уровнях автоматизации (телеуправление, уровни 1–3) производительность временно снижается на 20–25% и лишь полностью автономный режим даёт устойчивый прирост [8].

Закключение

1. БВР – определяющий передел открытых горных работ: буровзрывным способом отбивают до 90% скального объёма, на отбойку приходится 20–35% себестоимости, а качество дробления транслируется вниз по цепочке – рост среднего куска с 350 до 550 мм снижает производительность экскаватора в 1,5 раза. Это делает роботизацию БВР приоритетной точкой цифровой трансформации горного производства.

2. Предложены единая пятиуровневая шкала автоматизации по пяти переделам (бурение, проектирование, заряжание, взрывание, диагностика) и интегральный показатель $I_{роб}$ с весами, нормированными по вкладу переделов. Для типичного карьера $I_{роб} \approx 56\%$, для целевого роботизированного сценария – $\approx 88\%$ (расчёт авторов); резерв сосредоточен в заряжании и переводе бурения/проектирования в автономный режим.

3. Модельный прогноз по Кузнецову–Раммлеру и Свебреку показал, что переход к автоматизированному контуру смещает x_{50} с 420 до 350 мм и снижает негабарит с 7,8 до 2,9% (–4,9 пп) (расчёт авторов). Обобщённые отраслевые эффекты: отклонение скважин –50...–75%, негабарит –40...–65%, удельный расход ВВ –5...–12%, производительность бурения +10...+20%, сейсмика –15...–30%.

4. Наибольшую отдачу даёт связка «высокоточное бурение + автоматическое проектирование сетки + электронное инициирование + нейросетевая диагностика дробления», замкнутая обратной связью в АСУ ТП и цифровом двойнике. Дорожная карта: 1) оснащение станков высокоточным позиционированием и контролем недобура/перебура; 2) автоматизация паспорта и сетки по 3D-модели блока; 3) роботизация заряжания; 4) переход на электронное инициирование; 5) онлайн-диагностика гранулометрии и замыкание контура mine-to-mill.

5. Ограничения – капиталоёмкость, окупаемость 18–36 мес, дефицит регламентов для автономной техники и требования к качеству данных; на этапе телеуправления возможно временное снижение производительности на 20–25%. Дальнейшие исследования – калибровка весов $I_{роб}$ по фактическим данным и валидация прогноза гранулометрии на промышленных блоках.

Список литературы / References

- Афанасьев П.И. Методологические основы взрывного разрушения горных пород при разработке месторождений открытым способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12):28–41. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12/12_2025_28-41.pdf (дата обращения: 22.03.2026).
Afanasev P.I. Methodological framework for rock blasting in open pit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12):28–41. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12/12_2025_28-41.pdf (accessed: 22.03.2026).
- Вохмин С.А., Курчин Г.С., Шевнина Е.В., Кирсанов А.К., Костылев С.С. Прогнозирование гранулометрического состава отбитой горной массы при отработке месторождений открытым способом. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2020;(1):14–24. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-14-24>
Vokhmin S.A., Kurchin G.S., Shevnina E.V., Kirsanov A.K., Kostylev S.S. Granulometric composition predicting models after explosion in open-pit mining. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Gornyy Zhurnal*. 2020;(1):14–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-1-14-24>

3. Маринин М.А., Рахманов Р.А., Аленичев И.А., Афанасьев П.И., Сушкова В.И. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(6):111–125. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111
Marinin M.A., Rakhmanov R.A., Alenichev I.A., Afanasyev P.I., Sushkova V.I. Effect of grain size distribution of blasted rock on WK-35 shovel performance. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):111–125. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111
4. Маринин М.А., Маринина О.А., Рахманов Р.А. Методический подход к оценке влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на стоимость горных работ. *Горный журнал*. 2023;(9):28–34. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.09.04>
Marinin M.A., Marinina O.A., Rakhmanov R.A. Methodological approach to assessing influence of blasted rock fragmentation on mining costs. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(9):28–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.09.04>
5. Шигин А.О., Гилёв А.В., Шигина А.А. Автоматизация шарошечного бурения взрывных скважин на карьерах. *Горный журнал*. 2017;(2):82–86. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.16>
Shigin A.O., Gilyov A.V., Shigina A.A. Automation of rotary blasthole drilling in open pit mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(2):82–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.02.16>
6. Никитенко М.С., Худогонов Д.Ю., Кизилов С.А. Альтернативные подходы к определению положения техники на горно-добывающих предприятиях. *Записки Горного института*. 2025;275:167–178. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16718> (дата обращения: 22.03.2026).
Nikitenko M.S., Khudonogov D.Y., Kizilov S.A. Alternative frameworks for equipment positioning in mining operations. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:167–178. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16718> (accessed: 22.03.2026).
7. Чешчин Д.О., Плоких В.В. Автоматизация в горной промышленности и ударная машина для роботизированного комплекса. *Проблемы недропользования*. 2022;(1):46–54. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.01.046>
Cheshchin D.O., Plokhikh V.V. Automation in the mining industry and impact machine for a robotic complex. *Problems of Subsoil Use*. 2022;(1):46–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.01.046>
8. Коваленко В.С., Зырянов И.В. Автоматизация и роботизация горного производства – современный этап перехода к высокопроизводительному и безопасному ведению открытых горных работ. *Горная промышленность*. 2025;(5):124–130. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130>
Panfilov S.Yu., Tikhonov V.A., Dudnik G.A., Gadzhiev G.G., Melnikov N.O., Akinin N.I. Automation and robotization of mining production: the current stage of transition to high-performance and safe surface mining. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):124–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-124-130>
9. Маринин М.А. Расчет параметров буровзрывных работ на заданный гранулометрический состав взорванной горной массы при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. *Горный журнал*. 2025;(3):79–86. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.11>
Marinin M.A. Drill&blast design for preset grain-size composition of broken rocks in open pit mineral mining. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(3):79–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.03.11>
10. Сахапова Т.С., Проценко К.Ю., Тихонова Е.А., Ипатова М.А. Обзор зарубежных производителей смесительно-зарядной техники для открытых горных работ. *Горная промышленность*. 2022;(3):79–83. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-79-83>
Sakhapova T.S., Protsenko K.Yu., Tikhonova E.A., Ipatova M.A. Overview of foreign manufacturers of mixing and charging equipment for surface mining. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):79–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-79-83>
11. Жуликов В.В., Князев К.А., Назаров С.С. Обоснование эффективности взрывных работ с использованием электронных систем в сравнении с неэлектрическими средствами инициирования. *Горная промышленность*. 2022;(5):64–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-64-68>
Zhulikov V.V., Knyazev K.A., Nazarov S.S. Justification of blasting efficiency using electronic systems in comparison with non-electric primers. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):64–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-64-68>
12. Шер Е.Н. Моделирование разрушения горных пород сближенными шпуровыми зарядами при контурном взрывании. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023;(5):70–77. <https://doi.org/10.15372/FTPRI20230508>
Sher E.N. Modeling rock fracture in closely spaced perimeter blasting. *Journal of Mining Science*. 2023;59(5):763–769. <https://doi.org/10.1134/S1062739123050083>
13. Дремин А.В., Ситдикова С.В., Великанов В.С., Стожков Д.С., Гришин И.А. Анализ кусковатости горных пород в реальном времени с использованием отечественного программно-аппаратного обеспечения. *Горная промышленность*. 2025;(3):118–123. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123>
Dremin A.V., Sitdikova S.V., Velikanov V.S., Stozhkov D.S., Grishin I.A. Real-time analysis of particle size distribution of rocks using a domestic software and hardware complex. *Russian Mining Industry*. 2025;(3):118–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-118-123>
14. Великанов В.С., Дремин А.В., Чернухин С.А., Ломовцева Н.В. Технологии нейронных сетей в интеллектуальном анализе данных гранулометрического состава взорванных пород. *Горная промышленность*. 2024;(4):90–94. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94>
Velikanov V.S., Dremin A.V., Chernukhin S.A., Lomovtseva N.V. Neural network technologies in mining data on particle size distribution of muck pile rocks. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):90–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-90-94>

15. Маринин М.А., Афанасьев П.И., Сушкова В.И., Устименко К.Д., Ахметов А.Р. Опыт применения модели Кузнецова-Раммлера при описании распределения грансостава взорванной горной массы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):96–109. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_96
Marinin M.A., Afanasyev P.I., Sushkova V.I., Ustimenko K.D., Akhmetov A.R. The experience of using the Kuz-Ram model in describing of grain size distribution of blasted rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):96–109. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_96
16. Ракишев Б.Р., Орынбай А.А., Ауэзова А.М., Куттыбаев А.Е. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(8):83–94. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94>
Rakishev B.R., Orynbay A.A., Auezova A.M., Kutybaev A.E. Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(8):83–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94>
17. Ouchterlony F. The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*. 2005;114(1):29–44. <https://doi.org/10.1179/037178405X44539>
18. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование. *Записки Горного института*. 2022;257:822–832. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84>
Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:822–832. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84>
19. Гаврилкович Э.Г., Оника С.Г., Гец А.К., Жуков С.А. Гранулометрический состав кусков взорванной горной массы и его вероятностное распределение в условиях карьера природного камня. *Горный журнал*. 2022;(4):52–56. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.04.08>
Gavrilkovich E.G., Onika S.G., Gets A.K., Zhukov S.A. Fragment size distribution and its probability distribution in blasted rock mass in a natural stone quarry. *Gornyi Zhurnal*. (In Russ.) 2022;(4):52–56. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.04.08>
20. Клебанов А.Ф., Еремкин И.В., Габусу П.А. Цифровые двойники процессов управления высокоавтоматизированными горнотранспортными комплексами. *Горная промышленность*. 2025;(4):61–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-61-70>
Klebanov A.F., Eremkin I.V., Gabusu P.A. Digital twins of control processes for highly automated mining transport complexes. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):61–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-61-70>
21. Жданев О.В., Власова И.М. Вызовы и приоритеты цифровой трансформации угольной отрасли. *Уголь*. 2023;(1):62–69. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-62-69>
Zhdanev O.V., Vlasova I.M. Digital transformation of the coal industry. *Ugol'*. 2023;(1):62–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-1-62-69>

Информация об авторе

Самарин Илья Вадимович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2430-5311>; e-mail: ivs@gubkin.ru

Information about the author

Ilya V. Samarin – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2430-5311>; e-mail: ivs@gubkin.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.06.2026
Поступила после рецензирования: 22.07.2026
Принята к публикации: 27.07.2026

Article info

Received: 12.06.2026
Revised: 22.07.2026
Accepted: 27.07.2026