



Оптимизация технологического процесса переработки карбонатных горных пород на щебень с применением специализированного программного обеспечения

М.М. Якубовский ✉, К.А. Мурзаханов, Д. Чупровс, А.Р. Гетманова

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ yakubovskiy_mm@pers.spmi.ru

Резюме: В статье рассмотрены особенности переработки карбонатных горных пород на щебень различных фракций. Высокий уровень потерь минерального сырья при добыче и переработке требует внедрения более сложных технологических схем производства. При этом актуальной задачей является повышение качества готовой продукции предприятий строительной отрасли. Совершенствование технологий освоения месторождений карбонатных пород предполагает внедрение селективной выемки разнородных пород, сокращение выхода отсевов дробления, расширение номенклатуры производимой продукции. Выполнен анализ технологического процесса переработки карбонатных пород на щебень, рассмотрено программное обеспечение, позволяющее моделировать процессы переработки горной массы. В специализированном программном обеспечении воспроизведена технологическая схема переработки полезного ископаемого на месторождении карбонатных пород, выполнено имитационное моделирование в различных интерпретациях компоновок оборудования. Полученная информация может служить основой для организации внутрикарьерных перевозок на предприятии, а также выполнения технико-экономических расчетов при новом строительстве или техническом перевооружении перерабатывающего производства.

Ключевые слова: грохочение, гранулометрический состав, дробильно-сортировочное оборудование, карбонатные породы, отсев, переработка горных пород, щебень

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRW-2026-0003 «Исследование процессов комплексного освоения недр Земли и глубокой переработки георесурсов».

Для цитирования: Якубовский М.М., Мурзаханов К.А., Чупровс Д., Гетманова А.Р. Оптимизация технологического процесса переработки карбонатных горных пород на щебень с применением специализированного программного обеспечения. *Горная промышленность*. 2026;(4S):180–186. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-180-186>

Optimization of the technological process for converting carbonate rocks into crushed stone using specialized software

M.M. Yakubovskiy ✉, K.A. Murzakhanov, D. Chuprovs, A.R. Getmanova

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ yakubovskiy_mm@pers.spmi.ru

Abstract: The article discusses specific features of processing carbonate rocks into crushed stone of various fractions. High level of mineral raw materials lost during mining and processing requires implementation of more complex production processes. At the same time, improving the quality of finished products is a pressing task for companies in the construction industry. Improving technologies for developing carbonate deposits involves implementing selective mining of heterogenous rocks, reducing the yield of crushing fines, and expanding the range of manufactured products. An analysis of the technological process for converting carbonate rocks into crushed stone was carried out, and a software suite for modeling rock mass processing operations was reviewed. A process flowsheet for carbonate rocks from the Melekhovo-Fedotovskoye deposit was reproduced within this dedicated software suite, and simulation modeling was performed for various equipment layout configurations. The information obtained can serve as a basis for organizing in-pit haulage at the mine, as well as for performing technical and economic calculations for new construction or technical upgrade of the processing facilities.



Keywords: screening, particle size distribution, crushing and screening equipment, carbonate rocks, screenings, rock processing, crushed stone

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Study of the processes of integrated development of the Earth's interior and deep processing of geological resources, project No. FSRW-2026-0003).

For citation: Yakubovskiy M.M., Murzakhanov K.A., Chuprovs D., Getmanova A.R. Optimization of the technological process for converting carbonate rocks into crushed stone using specialized software. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):180–186. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-180-186>

Введение

По объемам годовой производительности карьеров и экономической значимости готовой продукции перерабатывающих производств карбонатные породы занимают ведущие позиции в группе неметаллических полезных ископаемых. Общее количество разведанных запасов карбонатного сырья, по данным «Методических рекомендаций по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых», на территории Российской Федерации превышает 60,0 млрд т. С первого взгляда, этот показатель намного превосходит текущую и перспективную потребность в данном виде сырья. Однако недостаточная изученность геологического строения на наличие карстов и заглиненности продуктивной толщи приводит к необоснованному отнесению раздробленных, выветрелых и некондиционных карбонатных пород к балансовым запасам, вследствие чего проектные потери полезного ископаемого существенно занижаются.

Важная особенность была отмечена в свое время И.Б. Шлаиным [1] в отношении геологоразведочных работ на месторождениях карбонатных пород. Из-за слишком крупной сетки бурения (непопадание в керн определенного количества слабых пород) и вымывания глинистых частиц в процессе бурения имеет место завышение прочности пород и однородности массива по сравнению с фактической ситуацией, ввиду чего допустимый выход керна из скважин (80%) недостаточен для характеристики прочностного состава пород. А.В. Тимохиным предложен метод геометризации параметров засоряющих пород в массиве известняка на основе геофизических исследований [2], призванный увеличить достоверность геологических работ.

Таким образом, отсутствие достоверной геологической информации о структуре месторождения не позволяет на стадии проектирования принимать оптимальные организационно-технические решения по технологиям добычи [3; 4] и, тем более, переработки карбонатного сырья. В результате существенная часть запасов полезного ископаемого, определяемая на этапах геологоразведочных работ и проектирования как кондиционная, при эксплуатации идентифицируется как внутренняя вскрыша и перемещается в отвалы вскрышных пород. Фактические потери полезного ископаемого при этом существенно возрастают и складываются из эксплуатационных потерь непосредственно в карьере и технологических потерь на этапе переработки минерального сырья [5; 6]. Вопросам сокращения потерь и разубоживания при разработке карбонатных пород за счет внедрения в производство фрезерных комбайнов посвящены работы С.И. Фомина [7; 8] и А.Ю. Чебана [9].

Отличительной особенностью большинства карбонат-

ных пород, в частности, известняков, мела и доломитов, является применение в различных специализированных производствах, таких как черная и цветная металлургия (флюс, выплавка стали, обогащение руд), химическая промышленность, цементная промышленность, промышленное, гражданское и дорожное строительство (щебень, облицовочный камень), а также производства резины, стекла, сахара, огнеупоров, удобрений и раскисляющих почву составов, минеральной подкормки в животноводстве и птицеводстве [10–12]. По мере развития технологий переработки минерального сырья можно ожидать расширение направлений использования карбонатных пород. Одной из таких технологий может стать производство высокопрочного известнякового и доломитового щебня путем пропитки расплавом серы [13].

Разнообразие областей применения карбонатного сырья определяет различные требования к качеству карбонатных пород (химический и минеральный состав, физико-механические и технологические свойства). Факторами, ограничивающими применение карбонатных пород, являются содержание вредных примесей и компонентов, величина удельной концентрации естественных радионуклидов, химическая чистота [14; 15].

Относительно низкокачественные по химической чистоте и минеральному составу, но обладающие высокими прочностными характеристиками, карбонатные породы используются главным образом для производства строительного щебня. Выход готовой продукции (щебня фр. 5–20 мм и фр. 20–40 мм) при разработке большинства таких месторождений не превышает 45% [16], качество получаемого щебня зависит от содержания в сырье глинистых примесей, которые не получается извлечь в процессе сухой переработки на грохотильном оборудовании. Химически чистые карбонатные породы подлежат более глубокой переработке и имеют гораздо более высокую добавленную стоимость. При этом технология добычи минерального сырья в карьере определяется в первую очередь физико-механическими свойствами породы и масштабами производства.

Объединяет все технологии добычи и переработки карбонатных пород высокий выход отходов (до 60–80% от объемов добычи горной массы) в виде песков-отсевов дробления (мелкой фракции 0–4 мм, 0–5 мм), не имеющих практической ценности. Причем значительная часть этих отходов (до 20–30%) образуется непосредственно в карьере в процессе подготовки горной массы к выемке. Поскольку буровзрывные методы раздельной выемки, успешно применяемые при добыче рудных полезных ископаемых [17–19], неэффективны и слишком дороги в отношении карбонатных пород, наиболее приемлемым здесь будет



механическое дробление посредством навесного (например, клыки-рыхлители, гидромолоты, фрезы, виброрипперы) [20] и самоходного оборудования (фрезерные комбайны [21], бульдозерные агрегаты [22]).

Материалы и методы

Трендом последних лет является стремление к консолидации в сегменте нерудных материалов (особенно щебня) и развитие направлений глубокой переработки как пути повышения качества и расширения ассортимента продукции, а в конечном счете, маржинальности бизнеса в условиях высокой конкуренции. Изменения в технологии переработки минерального сырья, например, переход с мокрого на сухой способ производства цемента, вызывают необходимость перестройки производственных процессов в карьере.

Вопросу минимизации образования мелких фракций (отсева) в карьерах путем оптимизации схемы дробления и прогнозирования содержания лещадных зерен посвящены работы зарубежных авторов [23–25]. Ученые из Бразилии выполнили моделирование работы конусной дробилки HP500. При этом для прогнозирования производительности дробилки при различных настройках и составах питания использовалась модель Андерсена–Уитена [26].

Китайским ученым X. Zhao выполнен сравнительный анализ технологических схем и предложена методика выбора дробильного оборудования для достижения требуемой производительности и качества производимой щебеночной продукции [27].

Очевидно, что применение современного высокопроизводительного дробильно-сортировочного оборудования позволит повысить выход товарных фракций и снизить энергоемкость процессов переработки полезного ископаемого. При этом возникают вопросы, связанные с организацией эффективной работы таких комплексов, которая в немалой степени может быть обеспечена за счет внедрения циклично-поточной технологии [28].

Выявить взаимодействие факторов, не определяемое традиционными методами, позволяет методология планирования эксперимента (DoE) для количественной оценки влияния параметров дробилки (CSS, скорость эксцентрика) на эффективность всего дробильно-сортировочного комплекса [29].

Широкие возможности для оптимизации процессов переработки горных пород, включая прогнозирование гранулометрического состава готовой продукции, выход отсева, энергоемкость производства, предоставляет современное программное обеспечение, например, программные комплексы JKSImMet [30] и Bruno Simulation Software¹.

В работе представлен пример оптимизации процесса переработки горной массы с помощью специализированного программного обеспечения (ПО). В качестве объекта исследования выбрано месторождение карбонатных пород. Полезные ископаемые представлены доломитами с прослоями доломитизированных известняков (содержание MgO свыше 16,0%), доломитизированными известняками (содержание MgO 6,0–16,0%) и известняками (содержание MgO до 6,0%), пригодными для использования в качестве сырья для стекольной промышленности, производства строительного щебня и извести. Переработка добытого полезного ископаемого осуществляется на стационарном дробильно-сортировочном заводе (ДСЗ) за пределами горного отвода. В процессе переработки, в зависимости от реализуемого режима производства, 47,0–73,0% перерабатываемого сырья уходит в отсеv. Высокий уровень технологических потерь обусловлен низкими прочностными характеристиками пород и высокой степенью переработки полезного ископаемого. Перечень выпускаемой продукции зависит от режима производства и соответствующего спроса [31].

Результаты и их обсуждение

В специализированном программном обеспечении была воспроизведена технологическая схема с аналогичным оборудованием, характеристиками исходного материала и объемами подачи питания. Ключевыми показателями здесь являются значения исходного потока: плотность, дробимость, индекс работы Бонда (расход энергии, кВт/ч, на одну тонну материала крупностью частиц менее 100 мкм и их содержанием не менее 80%), абразивность, влажность, процент примесей. Технические характеристики базового дробильного оборудования ДСЗ и оборудования, принятого для моделирования процесса дробления, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Технические характеристики дробильного оборудования

Показатель	Базовое оборудование			Проектное оборудование		
	I	II	III	I	II	III
Стадия дробления						
Модель дробилки	СМД-111	КСД-1750	СМД-75А	С160+МВ655	GP500S	NP1110
Тип	Щековая	Конусная	Роторная	Щековая	Конусная	Роторная
Мощность, кВт	90	160	132	250	255–310	110–200
Макс. размер куска, мм	1050	720	1000	1060	312	600
Разгрузочная щель, мм	130–165	25–60	16–200	10–500	8–128	10–130

Table 1
Technical specifications of the crushing equipment

На первой стадии дробления определяющим показателем является максимальный размер подаваемого на дробление куска породы. В основе дальнейшего выбора оборудования находится способность принимать весь поток пород, образующийся после дробления в щековой дробилке, а также конечный результат отсева раздробленного материала. Полученная в результате моделирования технологическая схема завода-аналога (рис. 1) обеспечивает переработку исходного материала в количестве 2600 т в смену.

¹ Pursio S. Q&A: Bruno simulation software for optimizing aggregate production. February 6, 2019. Available at: <https://www.metso.com/insights/blog/aggregates/bruno-simulation-software-explained> (accessed: 11.12.2025); Rock processing simulation software. February 1, 2013. Available at: <https://www.engineerlive.com/content/rock-processing-simulation-software> (accessed: 12.12.2025); Daunt A. Tutt Bryant delivers elite mobile crushing solution. November 24, 2025. Available at: <https://www.quarrymagazine.com/tutt-bryant-delivers-elite-mobile-crushing-solution/> (accessed: 11.12.2025)



Таблица 2
Сравнительная характеристика
рассева продуктов дробления

Table 2
Comparative characteristics of
screen sizing of the crushed
products

Наименование продукции	Базовый вариант		Проектный вариант	
	%	т/ч	%	т/ч
Исходная порода кр. 0–1000 мм	100	325,0	100	325,0
Щебень фр. 20–50 мм	35	42,0	33	41,0
Щебень фр. 50–80 мм	25	30,1	31	39,0
Щебень фр. 80–120 мм	40	48,1	36	45,0
Итого щебня	37	120,2	38	125,0
Отсев (фр. 0–20 мм)	63	204,8	62	200,0

Материальный баланс горной массы приведен в табл. 2. Сопоставление базового рассева продукции и результатов моделирования в специализированном ПО подтверждает корректность составленной технологической схемы завода-аналога применительно к условиям рассматриваемого объекта.

Основным показателем эффективности процесса переработки является коэффициент выхода готовой продукции, обратно пропорциональный количеству отсева. Сокращение объемов транспортирования горной массы, а точнее, отходов дробления в виде отсева возможно путем более активного внедрения в производство комплексов внутрикарьерного дробления. Актуальность в данном случае приобретают вопросы, связанные с размещением дробильно-сортировочного оборудования и перегрузочных складов промпродукта [32–34].

На основе разработанной модели стационарного завода-аналога рассмотрены альтернативные компоновки с частичной и полной заменой дробильно-сортировочного оборудования на базе стационарных и мобильных агрегатов, выполнено моделирование процесса переработки в специализированном ПО.

В ходе исследования было изучено влияние различных характеристик исходной породы (крупность, плотность, дробимость, абразивность, индекс Бонда, влажность) и параметров технологии (количество циклов дробления, наличие/отсутствие предварительного грохочения, характеристики дробильного и сортировочного оборудования) на выход отсева.

Рассмотренные компоновочные решения предполагают в основном переход на комбинированную технологию переработки минерального сырья с переносом звена первичного дробления в выработанное пространство карьера (схемы №2, 3, 5, 6, 7), кроме того, был рассмотрен переход на полностью мобильное дробильно-сортировочное оборудование (схема №4). Все технологические схемы предусматривают предварительное грохочение с выделением карьерной мелочи в количестве 10–11% от перерабатываемого объема, при этом схемы №2, 3, 4 предполагают также получение готовой продукции непосредственно в карьере.

На рис. 1 представлена характеристика готовой продукции (щебня), получаемой в результате переработки горной массы по различным технологическим схемам.

По приведенным данным можно сделать вывод, что имеет место излишнее дробление пород, резко снижающее выход товарных фракций щебня (схемы №1 и 5). При этом промежуточное грохочение в данном случае не решает за-

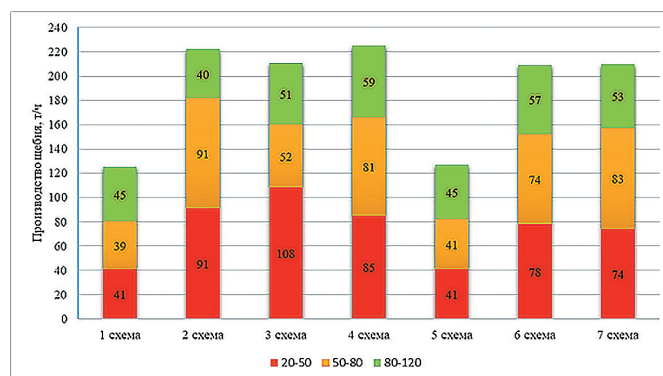


Рис. 1
Выход товарных фракций
щебня в абсолютных
величинах

Fig. 1
Output of commercial crushed
stone fractions in absolute
values

дачи повышения качества сырья, а лишь приводит к недогрузке оборудования и повышенным энергозатратам в расчете на 1 т производимой продукции. Переход на менее мощную мобильную щековую дробилку и исключение из технологической цепочки роторной дробилки позволяют существенно повысить выход товарных фракций щебня (схемы №6 и 7) и снизить удельное энергопотребление. А установка мобильных грохотов (схемы №2 и 3) обеспечивает разделение грузопотоков готовой продукции и отходов переработки горной массы (отсева), что существенно сокращает объемы перемещаемой в пределах земельного отвода предприятия горной массы. Наиболее высокий выход продукции в данном случае дает схема с использованием полностью мобильного оборудования. В сравнении с комбинированными схемами это выражается в 1–5% прироста щебня. Однако переход на мобильное дробильно-сортировочное оборудование (схема №4) в условиях действующего производства неэффективен и не может быть рекомендован к исполнению ввиду высоких эксплуатационных затрат, в том числе на топливо, и значительной занимаемой площади в карьере.

Заключение

Ключевой задачей выполненного исследования являлось сравнение технологий переработки горных пород с точки зрения сокращения удельных затрат на отдельные технологические процессы, включающие подготовку горной массы, транспортирование и собственно переработку горной массы.

Разделение грузопотоков непосредственно в карьере позволяет снизить объемы перемещаемой в пределах предприятия горной массы, а значит и затраты на данный технологический процесс. Переход на комбинированную технологию переработки минерального сырья с территориальным разделением звеньев первичного и вторичного дробления позволяет снизить объемы перемещения горной массы в рассматриваемых условиях в среднем на 10–11%, а при частичном выпуске готовой продукции в карьере объем транспортирования сокращается на 42–62%.

Оценивая вышеприведенные показатели, в условиях рассматриваемого производства наиболее близкой к рациональной является комбинированная технологическая схема с применением мобильной щековой дробилки Nordwheeler NW120 на первом этапе переработки и стационарной конусной дробилки GP500S на втором этапе.

Специализированное программное обеспечение позво-



ляют выполнить имитационное моделирование технологического процесса переработки горных пород на щебень в различных интерпретациях компоновок оборудования с выдачей данных по выходу готовой продукции и энергоэффективности производства. Получаемые при этом данные

могут служить основой для организации внутрикарьерных перевозок на предприятии, а также выполнения технико-экономических расчетов при новом строительстве или техническом перевооружении перерабатывающего производства.

Список литературы / References

1. Шлаин И.Б. *Разработка месторождений нерудного сырья*. М.: Недра; 1985. 344 с.
2. Тимохин А.В. Метод геометризации параметров засоряющих пород в массиве известняка на основе геофизических исследований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-1):162–176. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_162
Timokhin O.V. Geometrization of clay impurity areas in limestone rock mass based on geophysical research. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-1):162–176. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_162
3. Иванов В.В., Дзюрнич Д.О. Обоснование параметров технологической схемы разработки обводненных месторождений строительного песка. *Записки Горного института*. 2022;253:33–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3>
Ivanov V.V., Dzyurich D.O. Justification of the technological scheme parameters for the development of flooded deposits of construction sand. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:33–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3>
4. Якубовский М.М., Гетманова А.Р., Кузина А.В. Проблемы добычи строительных материалов и возможности их решения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(4):1706–1716. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1706-1716>
Yakubovskiy M.M., Getmanova A.R., Kuzina A.V. Problems of extraction of building materials and the possibilities of their solution. *Sustainable Development of Mountain Territories*. (In Russ.) 2024;16(4):1706–1716. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1706-1716>
5. Илатовский И.Ю., Петерс А.А., Шавлев Е.Г., Юдин А.В., Кошев Г.Я., Мальцев В.А. Повышение эффективности подготовки карбонатного сырья на основе ресурсосберегающих технологий. *Известия Уральской государственной горно-геологической академии. Серия: Горная электромеханика*. 2001;(12):175–184. Режим доступа: <https://iuggu.ru/download/12zip.pdf> (дата обращения: 19.04.2026).
Ilatovskii I.Yu., Peters A.A., Shchavlev E.G., Yudin A.V., Koshev G.Ya., Maltsev V.A. Improving the efficiency of carbonate raw material processing using resource-saving technologies. *Izvestiya Uralskoi Gosudarstvennoi Gorno-Geologicheskoi Akademii. Seriya: Gornaya Elektromekhanika*. 2001;(12):175–184. (In Russ.) Available at: <https://iuggu.ru/download/12zip.pdf> (accessed: 19.04.2026).
6. Ромашев А.О., Балашов А.О., Гатиатуллин Б.Л., Николаева Н.В. Исследование вибрационной сегрегации материала для интенсификации процесса грохочения. *Обогащение руд*. 2025;(4):8–14. <https://doi.org/10.17580/or.2025.04.02>
Romashov A.O., Balashov A.O., Gatiatullin B.L., Nikolaeva N.V. Study of vibrational segregation of material to intensify the screening process. *Obogashchenie Rud*. 2025;(4):8–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2025.04.02>
7. Фомин С.И., Чан Д.Б. Оптимизация потерь и разубоживания руды при открытой разработке сложноструктурных карбонатных месторождений. *Маркшейдерия и недропользование*. 2016;(2):58–60.
Fomin S.I., Tran D.B. Ore dilution and loss optimization for open-pit mining of carbonate rock deposits with complex structure. *Mine Surveying and Subsoil Use*. 2016;(2):58–60. (In Russ.)
8. Фомин С.И., Лелен А. Совершенствование методов определения потерь руды при проектировании разработки месторождения цементного сырья комбайнами послойного фрезерования. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024;335(2):202–208. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/2/4203>
Fomin S.I., Ljeljen A. Improvement of the methods for determining ore losses when designing cement raw material deposit mining by surface miner combines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(2):202–208. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/2/4203>
9. Чебан А.Ю. Применение фрезерных комбайнов в строительстве и на добыче строительных материалов. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2012;(3):105–108. Режим доступа: <https://togudv.ru/media/vestnik/articles/778.pdf> (дата обращения: 19.04.2026).
Cheban A.Yu. Application of milling combines in construction and mining of construction materials. *Bulletin of Pacific National University*. 2012;(3):105–108. (In Russ.) Available at: <https://togudv.ru/media/vestnik/articles/778.pdf> (accessed: 19.04.2026).
10. Егорова М.И., Пузанова Л.Н., Беляева Л.И., Бердникова Е.С. *Научно-практические основы применения известняково-го камня при производстве сахара*. Курск: ФГБНУ «Курский ФАНЦ»; 2023. 118 с.
11. Журавлев А.А. Рациональное использование сырья карбонатных месторождений. *Строительные материалы*. 2010;(6):17–19.
Zhuravlev A.A. Rational use of raw materials from carbonate deposits. *Stroitel'nye Materialy*. 2010;(6):17–19. (In Russ.)



12. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Лапунова К.А., Мальцев И.В. Характеристика и сырьевая база кремнисто-карбонатных пород как сырья для производства синтетического волластонита. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2025;336(6):84–95. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/6/4764>
Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V., Lapunova K.A., Maltseva I.V. Characteristics and raw material base of siliceous carbonate rocks as raw materials for synthetic wollastonite production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025;336(6):84–95. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/6/4764>
13. Фомин А.Ю., Аскарова Р.Н., Хозин В.Г. Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022;(1):56–63. https://doi.org/10.52409/20731523_2022_1_54
Fomin A.Y., Askarova R.N., Khozin V.G. High-strength crushed stone from carbonate rocks for the arrangement of bases in road pavement structures. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022;(1):56–63. (In Russ.) https://doi.org/10.52409/20731523_2022_1_54
14. Гуркин А.Ю. Использование карбонатных пород для производства бетона. Системные технологии. 2023;(1):45–50.
Gurkin A.Yu. The use of carbonate rocks for the production of concrete. *System Technologies*. 2023;(1):45–50. (In Russ.)
15. Шелихов Н.С., Рахимов Р.З. Особенности карбонатного сырья Татарстана и его применение для производства местных строительных материалов. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2010;(2):297–302. Режим доступа: https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2010/Shelikhov_Rahimov_297_302.pdf (дата обращения: 19.04.2026).
Shelikhov N.S., Rakhimov R.Z. Characteristics carbonate of raw material of tatarstan and its application for manufacture local materials. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2010;(2):297–302. (In Russ.) Available at: https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2010/Shelikhov_Rahimov_297_302.pdf (accessed: 19.04.2026).
16. Бардовский А.Д., Жуков В.П., Перевалов В.С., Рафиенко В.А. Производство щебня из карбонатных пород с использованием шнековых грохотов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003;(9):151–152.
Bardovskii A.D., Zhukov V.P., Perevalov V.S., Rafienko V.A. Production of crushed stone from carbonate rocks using screw screens. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2003;(9):151–152. (In Russ.)
17. 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>
18. Мысин А.В., Ковалевский В.Н. Моделирование состояния сложноструктурного массива с учетом динамического нагружения. *Горный журнал*. 2024;(5):38–47. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.05.03>
Mysin A.V., Kovalevskiy V.N. Modeling behavior of complex-structured rock mass with regard to dynamic impact. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(5):38–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.05.03>
19. Хохлов С.В., Виноградов Ю.И., Маккоев В.А., Абиев З.А. Влияние скорости детонации взрывчатых веществ на степень предразрушения горной породы при взрыве. *Горные науки и технологии*. 2024;9(2):85–96. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-177>
Khokhlov S.V., Vinogradov Yu.I., Makkoiev V.A., Abiyev Z.A. Effect of explosive detonation velocity on the degree of rock prefracturing during blasting. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):85–96. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-11-177>
20. Зайцев Г.Д., Ческидов В.И. Оценка технологических и технических возможностей оборудования для безвзрывной добычи полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(2):220–227.
Zaitsev G.D., Cheskidov V.I. Assessment of technological and technical capabilities of equipment for blastless mining of minerals. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2006;(2):220–227. (In Russ.)
21. Журавлев А.А. Перспективы применения фрезерных комбайнов для разработки карбонатных пород, используемых для производства щебня. *Строительные материалы*. 2009;(10):66–69.
Zhuravlev A.A. Perspectives of the use of rotary combines for mining of carbonate rocks used for rubble production. *Stroitel'nye Materialy*. 2009;(10):66–69. (In Russ.)
22. Аргимбаев К.Р., Лиготский Д.Н., Логинов Е.В. Бульдозерная технология открытой разработки известняково-доломитовых месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3):16–29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-16-29>
Argimbaev K.R., Ligotsky D.N., Loginov E.V. Bulldozer-based technology for open pit mining of limestone-dolomite deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(3):16–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-16-29>
23. Eswaraiah C., Gupta A., Nagarajan R., Rajavel M., Nandakumar K. Minimization of fines generation in size reduction of coals by impact crusher. *Fuel Processing Technology*. 2008;89(7):704–714. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.01.001>
24. Pacana A., Siwiec D., Bednarova L., Sofranko M., Vegsoova O., Cvoliga M. Influence of natural aggregate crushing process on crushing strength index. *Sustainability*. 2021;13(15):8353. <https://doi.org/10.3390/su13158353>
25. Wasson C. Daanen & Janssen boosting production with portable crushing plant. *Pit & Quarry*. Mar 17, 2025. Available at: <https://www.pitandquarry.com/daanen-janssen-boosting-production-with-portable-crushing-plant/#> (accessed: 12.12.2025).



26. Rocha B.K.N., Campos T.M., Silva J., Tavares L.M. Fit-for-purpose model of HP500 cone crusher in size reduction of itabirite iron ore. *Minerals*. 2024;14(9):919. <https://doi.org/10.3390/min14090919>
27. Zhao X. Analysis of crusher design and equipment selection for hard rock aggregate production line. *Cement Technology*. 2025;(5):84–88. (In Chinese). <https://doi.org/10.19698/j.cnki.1001-6171.20255084>
28. Osanloo M., Paricheh M. In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations: a literature review and research agenda. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020;34(6):430–457. <https://doi.org/10.1080/017480930.2019.1565054>
29. Bhadani K., Asbjörnsson G., Hofling K., Hulthén E., Evertsson M. Application of design of experiments (DoE) in evaluating crushing-screening performance for aggregates production. *Minerals Engineering*. 2024;209:108616. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108616>
30. Xu J. Simulation experiment of a circuit of SAG mill with trommel based on JKSImMet. *Mining & Processing Equipment*. 2024;52(2):20–25. (In Chinese). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3954.2024.02.005>
31. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(3):895–908. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908>
Zhukovsky Yu.L., Suslikov P.K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):895–908. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908>
32. Маринин М.А., Карасев М.А., Поспехов Г.Б., Поморцева А.А., Кондакова В.Н., Сушкова В.И. Комплексное изучение фильтрационных свойств окомкованных песчано-глинистых руд и режимов фильтрации в штабеле кучного выпечивания. *Записки Горного института*. 2023;259:30–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.7>
Marinin M.A., Karasev M.A., Posphehov G.B., Pomortseva A.A., Kondakova V.N., Sushkova V.I. Comprehensive study of filtration properties of pelletized sandy clay ores and filtration modes in the heap leaching stack. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:30–40. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.7>
33. Loginov E.V., Masalskiy S.S., Petrov K.D., Zadorina D.S. Implementation of digital technologies at blending stockpiles in open pit mineral mining. *Eurasian Mining*. 2025;(2):93–97. <https://doi.org/10.17580/em.2025.02.17>
34. Paricheh M., Osanloo M., Rahmanpour M. In-pit crusher location as a dynamic location problem. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017;117(6):599–607. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/V117N6A11>

Информация об авторах

Якубовский Матвей Матвеевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра разработки месторождений открытым способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1488-9317>; e-mail: yakubovskiy_mm@pers.spmi.ru

Мурзаханов Калимулла Ахмедуллович – ведущий инженер, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: murzakhanov_ka@pers.spmi.ru

Чупровс Димитрийс – студент, кафедра разработки месторождений открытым способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: dimitrij17@mail.ru

Гетманова Арина Романовна – аспирант, кафедра разработки месторождений открытым способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: a-getmanova@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 11.08.2026

Information about the authors

Matvey M. Yakubovskiy – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Open-Pit Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1488-9317>; e-mail: yakubovskiy_mm@pers.spmi.ru

Kalimulla A. Murzakhanov – Leading Engineer of the Property Complex Operations Department, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: murzakhanov_ka@pers.spmi.ru

Dimitriis Chuprovs – Student, Department of Open-Pit Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: dimitrij17@mail.ru

Arina R. Getmanova – Postgraduate Student, Department of Open-Pit Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: a-getmanova@mail.ru

Article info

Received: 07.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 11.08.2026