

УДК 622.275:622.274

Технико-экономическая оценка целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом

Ю. Г. Антипин*, И. В. Никитин, Ю. М. Соломеин

*Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия;
e-mail: geotech@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
27.11.2025;

получена
после доработки
24.12.2025;

принята
к публикации
29.12.2025

Ключевые слова:

глубокозалегающее
месторождение,
асбестовая руда, схема
комбинированной
разработки,
содержание асбеста,
производственная
мощность шахты,
схема вскрытия,
система разработки,
технико-экономические
показатели

Особенностью открытой разработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста является расположение карьеров "Центральный" и "Южный" в окружении промышленной и городской застройки, ограничивающей возможности дальнейшего развития открытых горных работ на глубоких горизонтах. Перенос этих строений сопряжен с колоссальными затратами и с экономической точки зрения не имеет смысла. В связи с этим актуальной является задача установления технической возможности и экономической целесообразности добычи асбеста подземным или открыто-подземным способами. Разработаны три варианта подземной геотехнологии вскрытия и отработки запасов за предельным контуром карьеров, учитывающих схему комбинированной разработки месторождения и отличающихся средним содержанием асбеста в балансовых запасах, применяемой системой разработки и годовой производственной мощностью шахты. Установлено, что комбинированная разработка месторождения технически возможна и экономически целесообразна по параллельной схеме с отработкой подземным способом запасов со средним содержанием асбеста 4,4 %, что обеспечивается применением современных высокоэффективных подземных геотехнологий. Это позволяет расширить сырьевую базу и продлить срок службы градообразующего предприятия на 8 лет.

Для цитирования

Антипин Ю. Г. и др. Технико-экономическая оценка целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-90-100>.

Feasibility study of mining Bazhenov chrysotile asbestos deposit by combined method

Yuriy G. Antipin*, Igor V. Nikitin, Yuriy M. Solomein

*The Institute of Mining of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;
e-mail: geotech@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Article info

Received
27.11.2025;

received
in revised form
24.12.2025;

accepted
29.12.2025

Key words:

deposit, asbestos ore,
scheme of combined
mining, asbestos content,
mine production capacity,
scheme of opening,
mining system, technical
and economic indicators

Abstract

A special feature of the open-pit mining of the Bazhenov chrysotile asbestos deposit is the location of the Tsentralny and Yuzhny pits surrounded by industrial and urban buildings, limiting the possibilities for further development of open-pit mining in deep horizons. The transfer of these buildings is associated with enormous costs and economically does not make any sense. In this regard, the task of establishing the technical and economic feasibility of mining asbestos by underground or open-underground methods is very urgent. Three variants of underground geotechnology have been developed for opening and mining reserves beyond the limit contour of pit taking into account the scheme of combined mining and differing in the asbestos content in the balance reserves, the mining system used and the mine production capacity. It has been established that the combined mining of the Bazhenov deposit is technically possible and economically feasible according to a parallel scheme with underground mining of reserves with an average asbestos content of 4.4 %, which is ensured by the use of modern highly efficient underground geotechnologies. This makes it possible to extend the service life of the enterprise by at least 8 years.

For citation

Antipin, Yu. G. et al. 2026. Feasibility study of mining Bazhenov chrysotile asbestos deposit by combined method. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 90–100. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-90-100>.

Введение

Доходность горнодобывающих предприятий, осуществляющих разработку крупных месторождений малоценных руд, обеспечивается за счет применения низкочастотной открытой геотехнологии. Учитывая высокую востребованность сырья, открытые горные работы (ОГР) на таких месторождениях отличаются масштабностью и долговременностью (Яковлев и др., 2018). Основной проблемой, с которой в перспективе придется столкнуться многим предприятиям, является наличие вблизи границ карьеров промышленной или городской застройки, отвалов вскрыши, что сильно ограничивает или вовсе делает нерентабельной дальнейшую углубку карьеров (Яковлев и др., 2015). Уже сейчас данная проблема актуальна для градообразующего предприятия – комбината "Ураласбест", эксплуатирующего крупнейшее в мире по запасам и уникальное по природным свойствам и чистоте минерала Баженовское месторождение хризотил-асбеста (Пуненков и др., 2024).

В настоящее время разработка Баженовского месторождения ведется открытым способом – двумя крупными карьерами "Центральный" и "Южный" на глубине 350 м (Корнилков и др., 2025). Производительность карьеров по руде – 12 млн т/год. Среднегодовое понижение добычных работ – 7–8 м. Предельная по технико-экономическим условиям глубина карьеров составляет 470 м (2036 г.). Развитие ОГР на глубоких горизонтах связано с расширением контуров карьеров по поверхности и пересмотром существующих границ земельного отвода, что потребует больших затрат на перенос жилых поселков, производственной инфраструктуры, изыскание дополнительных площадей для размещения отвалов вскрыши. За предельным контуром обоих карьеров имеются запасы, позволяющие продолжить эксплуатацию месторождения подземными горными работами (ПГР). В связи с этим весьма актуальной является задача установления технической возможности и экономической целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом.

Материалы и методы

Методология решения поставленной задачи базируется на комплексном подходе и предполагает обоснование подземной геотехнологии вскрытия и отработки запасов за предельным контуром карьеров. Подземная геотехнология должна соответствовать реализуемой схеме комбинированной разработки месторождения (последовательной или параллельной) и обеспечивать приемлемый уровень капитальных и эксплуатационных затрат при высокой производительности труда на основных технологических процессах добычи руды (Соколов и др., 2021). Основные решаемые задачи:

- анализ горно-геологических и горнотехнических условий и выявление перспективных для освоения подземным способом участков месторождения;
- определение годовой производственной мощности шахты по горным возможностям;
- разработка рациональной схемы вскрытия и подготовки запасов шахтного поля;
- выбор схемы внутришахтного транспорта, вентиляции и водоотлива;
- изыскание и конструирование эффективной и безопасной системы разработки;
- выбор основного технологического оборудования для проходческих и очистных работ;
- составление календарных планов вскрытия и отработки запасов шахтного поля;
- определение основных технико-экономических показателей и оценка эффективности освоения месторождения комбинированным способом.

Результаты и обсуждение

Анализ теории и практики комбинированной разработки рудных месторождений показал, что при последовательной схеме (ведение ПГР после завершения ОГР) возможно применение малозатратных и высокопроизводительных систем разработки с обрушением (Каплунов и др., 2003; Булатов и др., 2022; Flores et al., 2019); при параллельной схеме (одновременное ведение ОГР и ПГР) – систем разработки с открытым очистным пространством с конструктивными параметрами, обеспечивающими устойчивость бортов карьера (Казикаев, 2008; Лейзерович и др., 2012). Одним из основных преимуществ параллельной схемы является возможность реализации комплексных схем вскрытия с выдачей добытой руды из шахты и карьера по общим транспортным выработкам (Демидов и др., 2009; Гибадуллин и др., 2016).

Рассмотрены три варианта подземной геотехнологии, обеспечивающих реализацию различных схем комбинированной разработки Баженовского месторождения и отличающихся объемом запасов, подлежащих отработке подземным способом, и годовой производственной мощностью подземного рудника: вариант 1 – последовательная схема: промышленные запасы – 201,8 млн т, производственная мощность – 12 млн т/год; вариант 2 – параллельная схема: промышленные запасы – 97,5 млн т, производственная мощность – 6 млн т/год; вариант 3 – параллельная схема: промышленные запасы – 58,9 млн т, производственная мощность – 4 млн т/год.

Учитывая большую протяженность месторождения (около 6 км), по аналогии с ОГР оно разделено в плане на два шахтных поля, обрабатываемых двумя шахтами "Центральная" и "Южная" (Соколов и др.,

2014). Каждое шахтное поле разделено по высоте на два яруса (очереди): 1-я очередь – прибортовые запасы (отм. +20/–280 м), 2-я очередь – подкарьерные запасы (отм. –280/–480 м).

Вскрытие запасов каждого шахтного поля предусматривается двумя центрально-сдвоенными вертикальными (скиповым и клетевым) стволами с поверхности, вспомогательными наклонными автосъездами и вентиляционными восстающими, проходимыми из карьера, со строительством вентиляционно-сборочного и концентрационного горизонтов (рис. 1). Применение наклонных автосъездов и восстающих, проходимых из карьера, позволяет существенно (до 30 %) сократить время вскрытия запасов верхних этажей (Никитин, 2024), при этом обеспечиваются требования безопасности: проветривание горных работ и наличие не менее двух выходов из шахты. Высота этажа принята с учетом мировых тенденций увеличения параметров вскрытия и составляет 100 м.

Свежий воздух подается по клетевому стволу, проходит по квершлагам и штрекам и поступает к местам ведения горных работ. Исходящая струя направляется на вентиляционно-сборочный горизонт и через вентиляционные восстающие выдается в карьер, частично по наклонным автосъездам и скиповому стволу – на поверхность. Общий расход воздуха – не более 360 м³/с. Комплекс главного водоотлива предусматривается в центре шахтного поля у клетевого ствола.

Добытая руда и порода от проходки выработок перепускаются на концентрационный горизонт, по которому осуществляется автоматизированная локомотивная откатка по кольцевой схеме до стволов. Погрузка горной массы в вагоны, ее перемещение со скоростью 15 км/ч и разгрузка производятся в автономном режиме. На рельсах устанавливаются специальные метки, позволяющие контролировать скорость и расстояние между составами, автоматизировать прохождение перекрестков. Аналогичные системы автоматизации рельсового транспорта внедрены на рудниках Kiruna (Швеция), Grasberg (Индонезия) и El Teniente (Чили) (Громов, 2020). Вариант 1 предполагает подъем руды по скиповому стволу непосредственно на поверхность (рис. 1, а), а варианты 2 и 3 – до горизонта +120 м, откуда по штольням руда доставляется на перегрузочный пункт в карьере и далее транспортируется железнодорожным транспортом по карьере на обогатительную фабрику (ОФ) (рис. 1, б и 1, в).

Руды месторождения имеют невысокую ценность, что предопределяет применение технологий, обеспечивающих минимальный уровень затрат на добычу руды. Вместе с тем крутой угол падения и значительная мощность рудных тел (от 20 до 150 м) позволяют применять технологии, основанные на использовании высокопроизводительных комплексов самоходного оборудования с автоматизированным управлением (Li et al., 2018; Sanchez et al., 2020). Для варианта 1 обоснована система подэтажного обрушения с торцовым выпуском при высоте подэтажа 25 м, для вариантов 2 и 3 – подэтажно-камерная система разработки с оставлением междукамерных целиков при высоте подэтажа 33 м. Использование технологии камерной выемки позволяет извлекать запасы с минимальным разубоживанием (не более 6 %). Формирование предохранительного целика толщиной до 40 м (при отработке запасов, сопряженных с карьером) обеспечивает сохранение устойчивости бортов карьера в период совмещения ОГР и ПГР.

Высокая интенсивность проходческих и очистных работ обеспечивается применением современных комплексов самоходных машин преимущественно на аккумуляторных батареях, что позволяет отказаться от строительства третьего вертикального (воздухоподающего) ствола и устройства дополнительной главной вентиляционной установки.

Организация строительства шахт "Центральная" и "Южная" принята исходя из условий обеспечения минимальных сроков их ввода в эксплуатацию и оптимизации инвестиций (рис. 2). Строительство шахт ведется по последовательно-параллельной схеме: по завершению одного вида работ (например, проходки стволов) на шахте "Центральная" шахтостроительные бригады и их мощности переключаются на выполнение аналогичного вида работ на шахте "Южная". По окончании строительства эксплуатация шахт ведется одновременно.

Вариант 1 предполагает последовательный переход с ОГР на ПГР, т. е. добыча руды подземным способом начинается после полной отработки карьеров (начиная с 2037 г.). Основными факторами, оказывающими существенное влияние на экономическую эффективность данного варианта, являются значительные капитальные вложения, высокая себестоимость добычи руды ПГР (в 2,6 раза выше, чем ОГР), характерное падение объемов годовой добычи и производства товарной продукции предприятия в период набора производственной мощности подземного рудника.

Варианты 2 и 3 предполагают параллельное ведение ОГР и ПГР в период доработки карьеров (начиная с 2033 и 2032 г. соответственно). Период совмещения ОГР и ПГР по обоим вариантам составляет 7 лет. Совместное производство ОГР и ПГР позволяет:

- компенсировать капитальные вложения и снизить себестоимость добычи руды ПГР;
- продлить период эксплуатации карьеров за счет постепенного увеличения объемов годовой добычи ПГР при пропорциональном сокращении добычи ОГР;
- обеспечить стабильность объемов годовой добычи и товарной продукции предприятия.

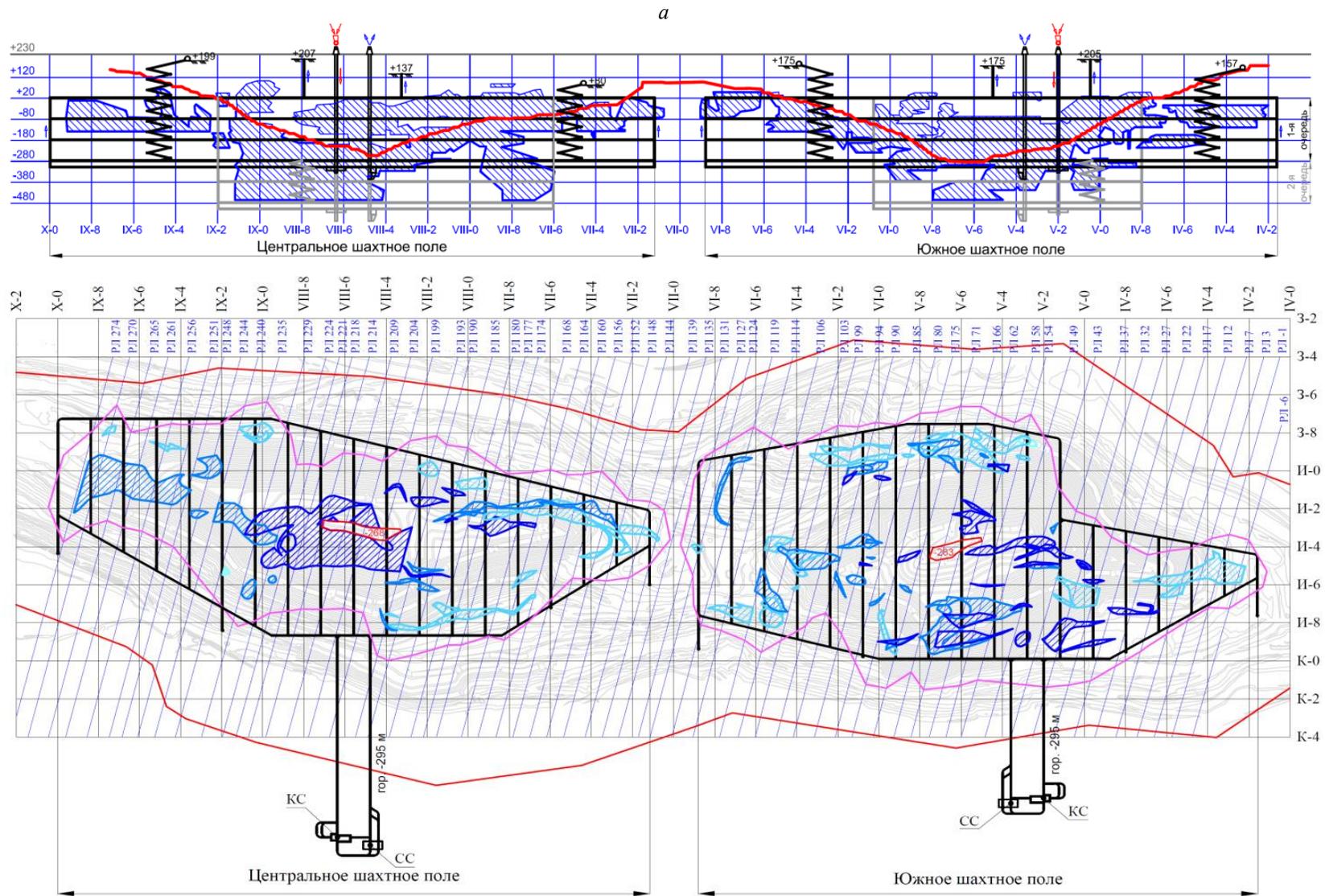


Рис. 1. Схема вскрытия запасов за проектным контуром карьеров Баженовского месторождения: *a* – вариант 1

Fig. 1. Scheme of opening of reserves of Bazhenov deposit outside the project outline of the quarries: *a* – option 1

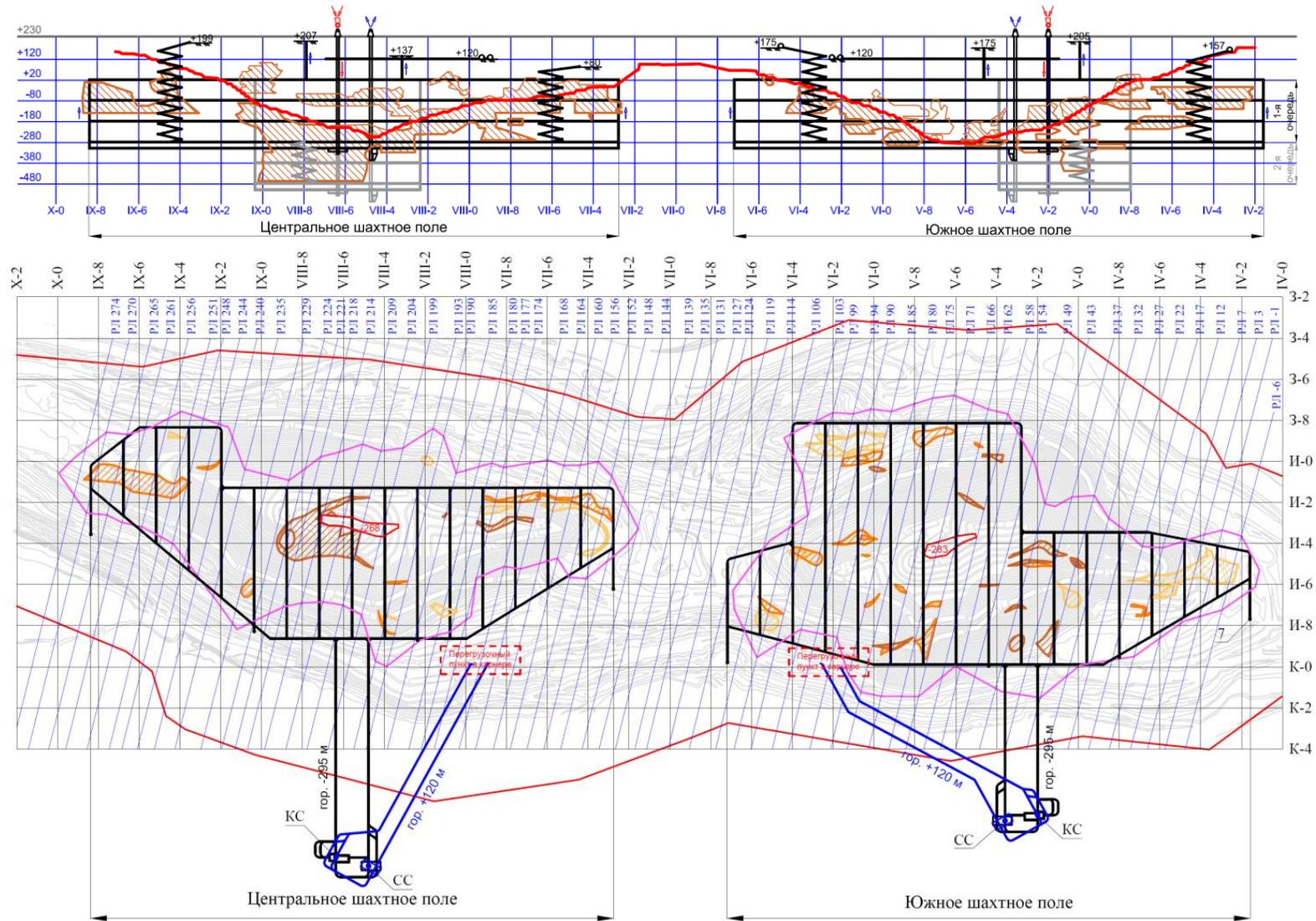


Рис. 1. Схема вскрытия запасов за проектным контуром карьеров Баженовского месторождения: в – вариант 3
 Fig. 1. Scheme of opening of reserves of Bazhenov deposit outside the project outline of the quarries: в – option 3

а

Наименование	Ед. изм.	Объем	Срок, лет	Годы																															
				2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	
Шахта "Центральная"																																			
Строительство 1-ой оч.	тыс. м ³	1127,0	7,6																																
Добыча руды	млн т	71,5	13,2																																
Строительство 2-ой оч.	тыс. м ³	529,8	4,4																																
Добыча руды	млн т	55,7	9,3																																
Шахта "Южная"																																			
Строительство 1-ой оч.	тыс. м ³	1048,0	7,3																																
Добыча руды	млн т	57,1	10,8																																
Строительство 2-ой оч.	тыс. м ³	434,6	3,8																																
Добыча руды	млн т	30,0	5,0																																

б

Наименование	Ед. изм.	Объем	Срок, лет	Годы																																
				2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045														
Шахта "Центральная"																																				
Строительство 1-ой оч.	тыс. м ³	994,8	6,5																																	
Добыча руды	млн т	21,7	7,9																																	
Строительство 2-ой оч.	тыс. м ³	385,9	3,6																																	
Добыча руды	млн т	11,2	3,7																																	
Шахта "Южная"																																				
Строительство 1-ой оч.	тыс. м ³	965,5	6,5																																	
Добыча руды	млн т	15,3	5,9																																	
Строительство 2-ой оч.	тыс. м ³	397,9	3,9																																	
Добыча руды	млн т	5,5	1,8																																	

в

Наименование	Ед. изм.	Объем	Срок, лет	Годы																																	
				2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044																
Шахта "Центральная"																																					
Строительство 1-ой оч.	тыс. м ³	912,6	5,5																																		
Добыча руды	млн т	15,3	8,5																																		
Строительство 2-ой оч.	тыс. м ³	365,0	3,3																																		
Добыча руды	млн т	7,9	3,9																																		
Шахта "Южная"																																					
Строительство 1-ой оч.	тыс. м ³	869,1	6,4																																		
Добыча руды	млн т	7,6	4,7																																		
Строительство 2-ой оч.	тыс. м ³	297,8	3,5																																		
Добыча руды	млн т	2,2	1,1																																		

Рис. 2. Календарный план строительства шахт и отработки запасов шахтных полей: а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3
 Fig. 2. Calendar plan for construction of mines and mining reserves of mine fields: а – option 1; б – option 2; в – option 3

Выполнена укрупненная экономическая оценка целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом по методике, изложенной в "Методических рекомендациях по оценке эффективности инвестиционных проектов"¹. В качестве основных оценочных показателей приняты:

– чистая прибыль – часть балансовой прибыли после уплаты налогов и других обязательных платежей в бюджет. Балансовая прибыль определяется как разница между выручкой от реализации продукции и себестоимостью продукции (без учета капитальных вложений);

– чистый дисконтированный доход (ЧДД) – сумма дисконтированных значений потока платежей, определяемого как разность между денежными притоками и оттоками, приведенными к единому моменту времени. Притоки денежных средств определяются выручкой от реализации товарной продукции, оттоки денежных средств – суммой капитальных и эксплуатационных затрат на добычу и обогащение руды, определенных с использованием данных комбината "Ураласбест" и предприятий-аналогов.

Выручка от реализации товарной продукции определена, исходя из количества асбеста, рассчитанного с учетом его выхода при добыче и обогащении, и цены реализации.

Капитальные затраты определены прямым суммированием затрат на горно-капитальные работы и приобретение технологического оборудования, необходимых для ввода в эксплуатацию обеих шахт и отработки запасов шахтных полей, а также затрат на строительство надшахтных зданий, сооружение инженерных сетей, реконструкцию транспортных коммуникаций и прочее.

Эксплуатационные затраты, связанные с производством асбеста, определены прямым суммированием затрат на добычу руды подземным и открытым способами, транспортирование добытой руды железнодорожным транспортом до ОФ, переработку добытой руды на ОФ.

Основные технико-экономические показатели по вариантам подземной геотехнологии приведены в таблице. Результаты оценки эффективности инвестиционного проекта по критерию чистого дисконтированного дохода (ЧДД) с учетом ОГР в пределах имеющихся мощностей обогащательного производства показаны на рис. 3. В качестве единого момента оценки принят 2026 г. Норма дисконта принята равной 12 % (на основе исследований SRK Consulting (Russia) Ltd).

Таблица. Основные технико-экономические показатели вариантов подземной геотехнологии
Table. Main technical and economic indicators of options for underground geotechnology

Показатель	Ед. изм.	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Промышленные запасы:				
– ОГР	млн т	0	48,0	60,0
– ПГР	млн т	201,8	97,5	58,9
Среднее содержание асбеста в промышленных запасах:				
– ОГР	%	2,25	2,25	2,25
– ПГР	%	3,3	4,0	4,4
Потери руды:				
– ОГР	%	0	6,0	6,0
– ПГР	%	14,1	47,9	47,4
Разубоживание руды:				
– ОГР	%	0	6,0	6,0
– ПГР	%	19,1	5,4	6,1
Эксплуатационные запасы:				
– ОГР	млн т	0	48,0	60,0
– ПГР	млн т	214,2	53,7	33,0
Производственная мощность подземного рудника	млн т/год	12	6	4
Объем горно-капитальных работ	млн м ³	3,1	2,7	2,4
Производительность труда	т/чел.-смену	145	105	100
Срок ввода шахты в эксплуатацию	лет	7,6	6,5	5,5
Срок отработки запасов	лет	22,5	11,8	12,4
Продолжительность периода совмещения ОГР и ПГР	лет	0	7	7
Объем асбеста:				
– ОГР	тыс. т	0	1 260	1 530
– ПГР	тыс. т	7 069	2 148	1 452

¹ Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция) : утв. Министерством экономики РФ; Министерством финансов; ГК по строительству, архитектуре и жилищной политике от 21.06.1999 № ВК 477. М., 2000. 423 с.

Общая выручка	млрд руб.	318,1	145,3	126,1
Капитальные затраты	млрд руб.	28,4	23,5	21,8
Эксплуатационные затраты	млрд руб.	217,2	83,7	63,9

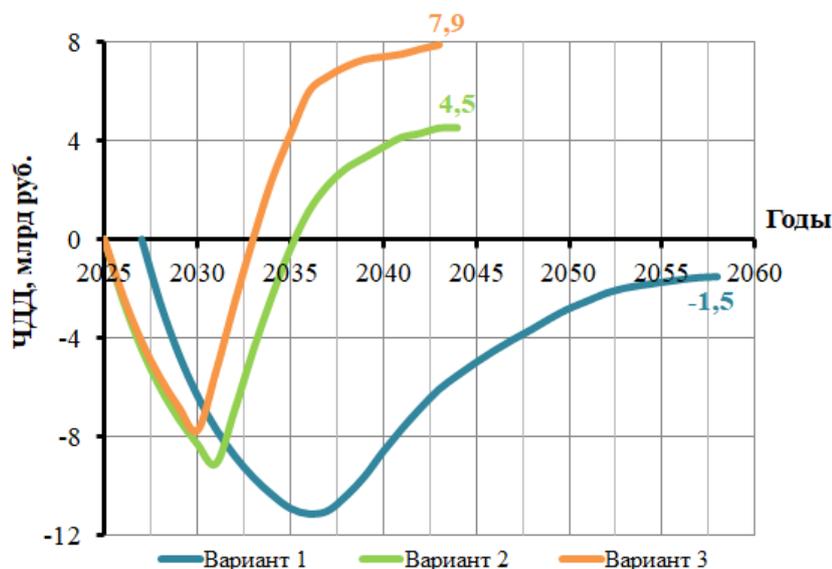


Рис. 3. График ЧДД нарастающим итогом по вариантам подземной геотехнологии
 Fig. 3. Graph of net present value (NPV) is cumulative by options for underground geotechnology

Анализ полученных результатов показал следующее:

– предложенные технические и организационные решения по вскрытию и отработке запасов за проектным контуром карьеров Баженовского месторождения ориентированы на применение современных высокоэффективных технологий и обеспечивают приемлемый уровень затрат на добычу руды;

– соотношение объемов выручки и текущих эксплуатационных затрат в операционной деятельности позволяет говорить о возможности извлечения нормальной прибыли (без учета капитальных вложений) по всем трем вариантам: среднегодовая чистая прибыль – 3,5–4,0 млрд руб.;

– реализация проекта требует весьма значительных инвестиций: общий объем капитальных вложений – 21,8–28,4 млрд руб., в том числе первоначальных – 9,4–14,8 млрд руб. Финансирование проекта может быть осуществлено только за счет заемных средств;

– расчетные значения критерия ЧДД (с учетом капитальных вложений) позволяют утверждать, что проект в нынешних условиях спроса и цены на продукцию комбината по варианту 3 является наиболее эффективным: ЧДД – 7,9 млрд руб., индекс доходности – 0,84, срок окупаемости – 7,4 лет.

Реализация проекта, помимо извлечения прибыли инвестором, обеспечивает достижение следующих целей: поддержание сырьевой базы и продление срока службы комбината "Ураласбест" на 8 лет без расширения границ горного отвода, поддержание уровня занятости населения и обеспечение социальной стабильности в г. Асбест, уплата налогов в бюджеты разных уровней.

Заключение

В результате исследования установлено, что комбинированная разработка Баженовского месторождения хризотил-асбеста, характеризующегося невысокой ценностью добываемой руды, технически возможна и экономически целесообразна при реализации параллельной схемы с отработкой подземным способом запасов со средним содержанием асбеста 4,4 %, что обеспечивается применением современных высокоэффективных подземных геотехнологий. Это позволяет расширить сырьевую базу и продлить срок службы градообразующего предприятия на 8 лет.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках госзадания № 075-00408-26-00, № гос. рег. 125070908257-0. Тема 1 (2025–2027) "Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России" (FUWE-2025-0001).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Булатов К. В., Дик Ю. А., Котенков А. В., Танков М. С. [и др.]. Новые технологические решения разработки кимберлитовых месторождений Якутии. Екатеринбург, 2022. 544 с.
- Гибадуллин З. Р., Калмыков В. Н., Петрова О. В. Технологические схемы транспортирования рудной массы при подземной отработке приконтурных запасов карьеров. Магнитогорск, 2016. 159 с.
- Громов Е. В. Цифровая трансформация технологических процессов подземных горных работ: ретроспективный анализ и мировой опыт // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 90–108. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-90-108>. EDN: AZQVDD.
- Демидов Ю. В., Звонарь А. Ю. Методические принципы проектирования схем вскрытия при комбинированной технологии разработки рудных месторождений // Горный журнал. 2009. № 6. С. 57–59. EDN: KWVCEP.
- Казикаев Д. М. Комбинированная разработка рудных месторождений. М. : Горная книга, 2008. 361 с.
- Каплунов Д. Р., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В. Комбинированная геотехнология. М. : Руда и металлы, 2003. 558 с.
- Корнилков С. В., Харисов Т. Ф., Масальский Н. А., Коптяков Д. А. Исследование физико-механических свойств пород прибортового массива карьера ПАО "Ураласбест" // Проблемы недропользования. 2025. № 1(44). С. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.01.016>. EDN: RZQVWR.
- Лейзерович С. Г., Помельников И. И., Сидорчук В. В., Томаев В. К. Ресурсовоспроизводящая безотходная геотехнология комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / под ред. Д. Р. Каплунова. М. : Горная книга, 2012. 547 с.
- Никитин И. В. Исследование схем вскрытия подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 2. С. 262–274. EDN: CXIKQG.
- Пуненков С. Е., Козлов Ю. С., Пуненков Н. С. Добыча и обогащение хризотилсодержащих руд // Горный журнал. 2024. № 4. С. 36–44. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.04.05>. EDN: UBFBNS.
- Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений / под общ. ред. И. В. Соколова. Екатеринбург, 2021. 340 с.
- Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. [и др.]. Об эффективности подземной разработки Тарыннахского и Горкитского железорудных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 3(47). С. 5–11. EDN: SMWLMJ.
- Яковлев В. Л., Корнилков С. В. Геотехнологические проблемы и особенности ведения горных работ на глубоких карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S56. С. 54–66. EDN: VGHNLV.
- Яковлев В. Л., Корнилков С. В., Соколов И. В. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья. Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2018. 360 с.
- Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel "macroblock variant" block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11, Iss. 3. P. 549–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>.
- Li J.-g., Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment // Engineering. 2018. Vol. 4, Iss. 3. P. 381–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>.
- Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020. Vol. 37. P. 1385–1399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-11>.

References

- Bulatov, K. V., Dik, Ju. A., Kotenkov, A. V., Tankov, M. S. et al. 2022. New technological solutions for the mining of kimberlite deposits in Yakutia. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Gibadullin, Z. R., Kalmykov, V. N., Petrova, O. V. 2016. Technological schemes of ore mass transportation during underground mining of open-pit reserves. Magnitogorsk. (In Russ.)
- Gromov, E. V. 2020. Digital transformation of technological processes of underground mining operations: A retrospective analysis and world experience. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 8, pp. 90–108. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-90-108>. EDN: AZQVDD. (In Russ.)
- Demidov, Yu. V., Zvonar, A. Yu. 2009. Methodological principles for designing opening schemes in combined mining technology for ore deposits. *Gornyi Zhurnal*, 6, pp. 57–59. EDN: KWVCEP. (In Russ.)
- Kazikaev, D. M. 2008. Combined mining of ore deposits. Moscow. (In Russ.)
- Kaplunov, D. R., Kalmykov, V. N., Ryl'nikova, M. V. 2003. Combined geotechnology. Moscow. (In Russ.)
- Kornilkov, S. V., Kharisov, T. F., Masal'skij, N. A., Koptjakov, D. A. 2025. Research of the physico-mechanical properties of rocks of the nearboard array of the quarry of PJSC "Uralasbest". *Problems of Subsoil Use*, 1(44), pp. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.01.016>. EDN: RZQVWR. (In Russ.)
- Lejzerovich, S. G., Pomel'nikov, I. I., Sidorchuk, V. V., Tomaev, V. K. 2012. Resource-producing waste-free geotechnology for the integrated development of deposits in the Kursk Magnetic Anomaly. Moscow. (In Russ.)

- Nikitin, I. V. 2024. Research of schemes for opening of sub-pit reserves of kimberlite deposits. *Izvestija Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*, 2, pp. 262–274. EDN: CXIKQG. (In Russ.)
- Punenkov, S. E., Kozlov, Yu. S., Punenkov, N. S. 2024. Mining and processing of chrysotile-bearing ore. *Mining Journal*, 4, pp. 36–44. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.04.05>. EDN: UBFBNS. (In Russ.)
- Sokolov, I. V., Antipin, Yu. G., Nikitin, I. V. 2021. Methodology for the selection of underground geotechnology in the combined mining of ore deposits. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Sokolov, I. V., Smirnov, A. A., Antipin, Yu. G., Nikitin, I. V. et al. 2014. On the effectiveness of underground mining of Tarynnakh and Gorkit iron ore deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 3(47), pp. 5–11. EDN: SMWLMJ. (In Russ.)
- Yakovlev, V. L., Kornilkov, S. V. 2015. Geotechnological problems and features of mining operations in deep quarries. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, S56, pp. 54–66. EDN: VGHNLV. (In Russ.)
- Yakovlev, V. L., Kornilkov, S. V., Sokolov, I. V. 2018. Innovative basis of the strategy of complex development of mineral resources. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Flores, G., Catalan, A. 2019. A transition from a large open pit into a novel "macroblock variant" block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), pp. 549–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>.
- Li, J.-g., Zhan, K. 2018. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, 4(3), pp. 381–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>.
- Sánchez, F., Hartlieb, P. 2020. Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37, pp. 1385–1399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-11>.

Сведения об авторах

Антипин Юрий Георгиевич – ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Институт горного дела Уральского отделения РАН, канд. техн. наук;
e-mail: geotech@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Yuriy G. Antipin – 58 Mamina-Sibiryaka Str., Ekaterinburg, Russia, 620075;
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: geotech@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Никитин Игорь Владимирович – ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Институт горного дела Уральского отделения РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: geotech910@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

Igor V. Nikitin – 58 Mamina-Sibiryaka Str., Ekaterinburg, Russia, 620075;
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher;
e-mail: geotech910@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

Соломенн Юрий Михайлович – ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Институт горного дела Уральского отделения РАН, науч. сотрудник;
e-mail: yuriysolo@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8226-6894>

Yuriy M. Solomein – 58 Mamina-Sibiryaka Str., Ekaterinburg, Russia, 620075;
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Researcher;
e-mail: yuriysolo@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8226-6894>