ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(2):124-138
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622:681.51:004.94 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_124

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

П.А. Каунг[1], В.В. Зотов[1], М.А. Гаджиев[1], С.И. Артемов[1], И.А. Гиреев[1]

[1] НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: kaungpyae05@gmail.com

Аннотация: Проведен анализ применяемых систем разработки при добыче полезных ископаемых. Сформулированы основные проблемы, возникающие в процессе разработки месторождений полезных ископаемых. Предложена методика, позволяющая решить задачу выбора технологии разработки месторождения полезных ископаемых и подбора рационального состава закладочной смеси при заданных параметрах закладки. Рассмотрен вопрос разработки методики перехода к цифровым моделям решения поставленных задач (на примере выбора состава закладочной смеси). Данная методика включает нечеткие модели и алгоритмы, которые способны обеспечить обработку больших массивов информации, сформировать факторы внешней среды (горно-геологические, организационные, экономические и производственно-технические). Цифровые модели определяют области внутренней среды, являющиеся приоритетными при выборе решения, и с учетом конструктивных и технологических параметров системы разработки дают возможность установить основные взаимозависимости между ними. Цифровая модель, в отличие от существующих, позволит произвести оценку интегральных показателей проекта уже на первых этапах подбора состава закладочной смеси. Сформулировано структурное представление цифровой модели проектного решения (выбора состава закладочной смеси). Цифровая модель базируется на основе системного анализа и формализации горно-геологических, технологических и внешних условий месторождения, что делает возможной сравнительную оценку интегральных показателей различных решений. Рекомендована информационная структура проектного варианта. Предложено применить коэффициент значимости технико-экономических показателей эффективности. Показано, что при совершенствовании решения задачи (на примере подбора состава закладочной смеси) цифровизация является не революционным методом, отрицающим прежние наработки, а нейтральным ускорителем поэтапного развития.

Ключевые слова: алгоритм, геотехноогия, добыча полезного ископаемого, закладочная смесь, интегральные показатели, модель, методика, прочность, прочностные характеристики, цифровая модель, цифровизация.

Для цитирования: *Каунг П. А., Зотов В. В., Гаджиев М. А., Артемов С. И., Гиреев И. А.* Формализация процесса выбора технологий отработки месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 124–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_124.

Formalization of selection procedure of mineral mining technologies

Kaung P.A.[1], Zotov V.V.[1], Gadzhiev M.A.[1], Artemov S.I.[1], Gireev I.A.[1]

[1] National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: kaungpyae05@gmail.com

Abstract: The current systems of mineral mining are reviewed. The major problems which can arise in the course of mineral mining are formulated. The procedure is proposed to select a mineral mining technology and backfill mixture composition at the preset backfill parameters. The necessity of the transition procedure to digital models is considered as a case-study of backfill mixture selection. This procedure should include fuzzy algorithms and models capable to process and interpret mass data and to identify the external influences (geological, managerial, economic and production factors). Digital models specify the internal environment domains to be of priority in decision-making and make it possible to interconnect these domains with regard to the mine design and mining technology. A digital model enables estimation of integral project parameters at the early stages of backfill composition selection. The structural performance of the digital model of a project solution (selection of backfill mixture) is formulated. The digital model uses the systemic analysis and formalization of geological, geotechnical and external conditions of a mineral deposit, which enables the comparative assessment of integral indices of different solutions. The information structure of a project variant is recommended. It is proposed to use weight factors for the efficiency rating. In the improved decision-making (in terms of selection of backfill composition), digitalization is not a revolutionary method contradictious to previous R&D results but a neutral accelerator of stage-wise development.

Key words: algorithm, geotechnology, mineral mining, backfill, integral indices, model, procedure, strength, strength characteristics, digital model, digitalization.

For citation: Kaung P. A., Zotov V. V., Gadzhiev M. A., Artemov S. I., Gireev I. A. Formalization of selection procedure of mineral mining technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(2):124-138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_124.

Введение

Интенсивное потребление добываемых ресурсов предопределяет высокие темпы развития геотехнологии, соответственно, и применение более безопасных и продуктивных технологий извлечения полезных ископаемых, а также более быстрое принятие решения при выборе технологии. Извлечение полезного ископаемого из недр — это сложный многоэтапный процесс, в котором участвуют: государство в лице различных контролирующих органов и министерств, частные инвесторы или владельцы предприятий, проектные, изыскательские, строительные и контролирующие организации.

В ходе разработки проектных решений активно используются современные информационные технологии и цифровые модели [1]. При этом технологии извлечения должны быть максимально безопасными [2], иметь минимальное влияние на экологическую среду [3]. Развитие цифровых технологий позволяет на этапах проектирования учесть потенциальные экономические риски [4]. При выборе вариантов разработки месторождений и принятии проектных решений, как правило, ориентируются на следующие критерии: стоимость строительства рудника; срок строительства рудника; срок службы рудника; экономическая эффективность. При этом не учитывают различные риски, которые возникают при выборе какого-либо технологического решения. Сложность выбора способов разработки и системы разработки месторождений, методов построения технологических схем, расчета технологических циклов и в целом всего, что входит в понятие технология

извлечения полезного ископаемого, ведет к необходимости создания моделей и алгоритмов при подборе составов закладочной смеси. Данные алгоритмы впоследствии позволят разработать самообучающуюся программу. На первоначальном этапе предполагается, что программа будет осуществлять подбор «идеального» состава закладочной смеси из имеющихся в базе данных. Полученные программой «идеальные» смеси, удовлетворяющие производственно-техническим и экономико-экологическим требованиям, будут применяться на предприятиях. Ввиду того, что программа самообучающаяся, и накопит большой объем базы данных, то она сможет самостоятельно проектировать и выбирать закладочные смеси.

Выбор системы разработки

В геотехнологии при выборе способа и систем разработки в основном учитываются технико-экономические показатели горного производства, при этом влияние данного производства на экологическую составляющую региона остается без должного внимания [5]. В связи с этим предпочтительное развитие получил открытый способ разработки месторождений полезных ископаемых, а при отработке месторождений подземным способом наиболее широкое признание получили системы разработки с принудительным обрушением руд и вмещающих пород. Применение данных технологий связано с нарушением земной поверхности, и не позволяет обеспечить экологическую безопасность горных работ [6].

Применение систем разработки с естественным поддержанием очистного пространства, обеспечивающих сохранение земной поверхности, позволяет решить экологические проблемы [7]. Экологическое воздействие техногенных отходов и дополнительные расходы на подготовку их к реализации в качестве промежуточных продуктов производства составляет весомую часть себестоимости добычи. Эколого-экономические затраты на хранение и транспортировку данных продуктов проанализированы в работе [8]. При этом необходимо учитывать, что системы с естественным поддержанием очистного пространства характеризуются высокими потерями запасов до 70–75%. Иногда в результате ошибок, допущенных при эксплуатации рудника, или в результате вторичной разработки (доработки) оставленных запасов возникают геотехногенные катастрофы, выражающиеся в обрушении поверхности и затоплении рудников (ОАО «Сильвинит» и ОАО «Уралкалий», Пермский край), прорыва воды из карьера в подземный рудник (рудник «Мир», Республика Якутия), горных ударах. Вследствие подобных проявлений возможно возникновение геотехногенных землетрясений (рудник «Умбозеро», Мурманская область, и другие [9, 10]), проявляются высокие динамические [11] и вибрационые воздействия на здания поверхностного комплекса, подземные выработки и гидротехнические сооружения [12, 13].

Для исключения влияния горного производства на экосистему Земли предлагается начать освоение минерально-сырьевой базы небесных тел [14]. Отсутствие урегулированной правовой основы [15, 16] и технологий [17], позволяющих начать извлечение полезного ископаемого с небесных тел, препятствуют осуществлению данной идеи в ближайшее время.

Системы с закладкой выработанного пространства

Из анализа мирового опыта следует, что до 35% рудников используют системы разработки с искусственным поддержанием очистного пространства, с применением твердеющей закладки, что предопределено постоянным увеличением

глубины разработки, усложнением и постоянным изменением горно-геологических условий [18].

При создании закладочных смесей в настоящее время занимаются вопросами разработки принципиально новых материалов [19], обладающих иной структурой или свойствами. Но на данном этапе наиболее простыми в приготовлении являются смеси на основе цементного вяжущего. На месторождениях с высокой ценностью руды применяют системы с твердеющей закладкой на основе цементного вяжущего, что позволяет обеспечить максимальную полноту извлечения.

Одним из основных преимуществ технологии отработки месторождений системами с искусственным поддержанием очистного пространства является надежность и безопасность [20]. При создании закладочного материала необходимо учитывать влияние взрывных работ [21].

На угольных месторождениях применяли сухую или гидравлическую закладку крупнодроблеными породами от проходки или специально добываемым песком. Твердеющую закладку на угольных месторождениях использовали в исключительных случаях: при извлечении мощных, крутопадающих пластов; при необходимости снижения эндогенной пожароопасности; при отработке пластов под охранными объектами [22]. В связи с низкой стоимостью добываемого сырья и высокой себестоимостью закладочных работ от закладки при разработке угольных месторождений отказались.

Применение системы разработки с искусственным поддержанием очистного пространства (с использованием закладки) позволяет:

- управлять горным давлением;
- повысить безопасность ведения горных работ;
- вести одновременную отработку месторождения подземным и открытым способами;
- повысить коэффициент извлечения;
- снизить негативное влияние горного производства на окружающую среду.

Помимо этого, применение закладки при добыче полезного ископаемого позволяет извлекать запасы, ранее считавшиеся забалансовыми, либо оставленные в целиках, что помимо уменьшения потерь и улучшения качества извлечения, приводит к увеличению срока существования рудника. Увеличение срока существования рудника позволяет сохранить рабочие места и решить социальный вопрос там, где горнодобывающее предприятие является градообразующим.

Для создания качественного закладочного массива необходим контроль гранулометрического состава инертного заполнителя. С целью стабилизации крупности заполнителя создано оборудование, позволяющее более тщательно разделять его по фракциям [23]. Ввиду наличия в отходах горного производства полезных компонентов перед включением в состав закладочной смеси необходимо внедрение технологий, позволяющих их дополнительную переработку [24] с учетом ресурсосберегающих технологий переработки минерального сырья [25].

Факторы конструктивно-технологических решений разработки состава смеси

Сложность и трудоемкость процесса подбора параметров закладки и состава закладочной смеси не позволяет детально прорабатывать несколько вариантов и составов, что не дает гарантии принятия оптимального решения. Следовательно, существует потребность в разработке и внедрении механизма, позволяющего достаточно быстро выполнять сравнительную оценку множе-

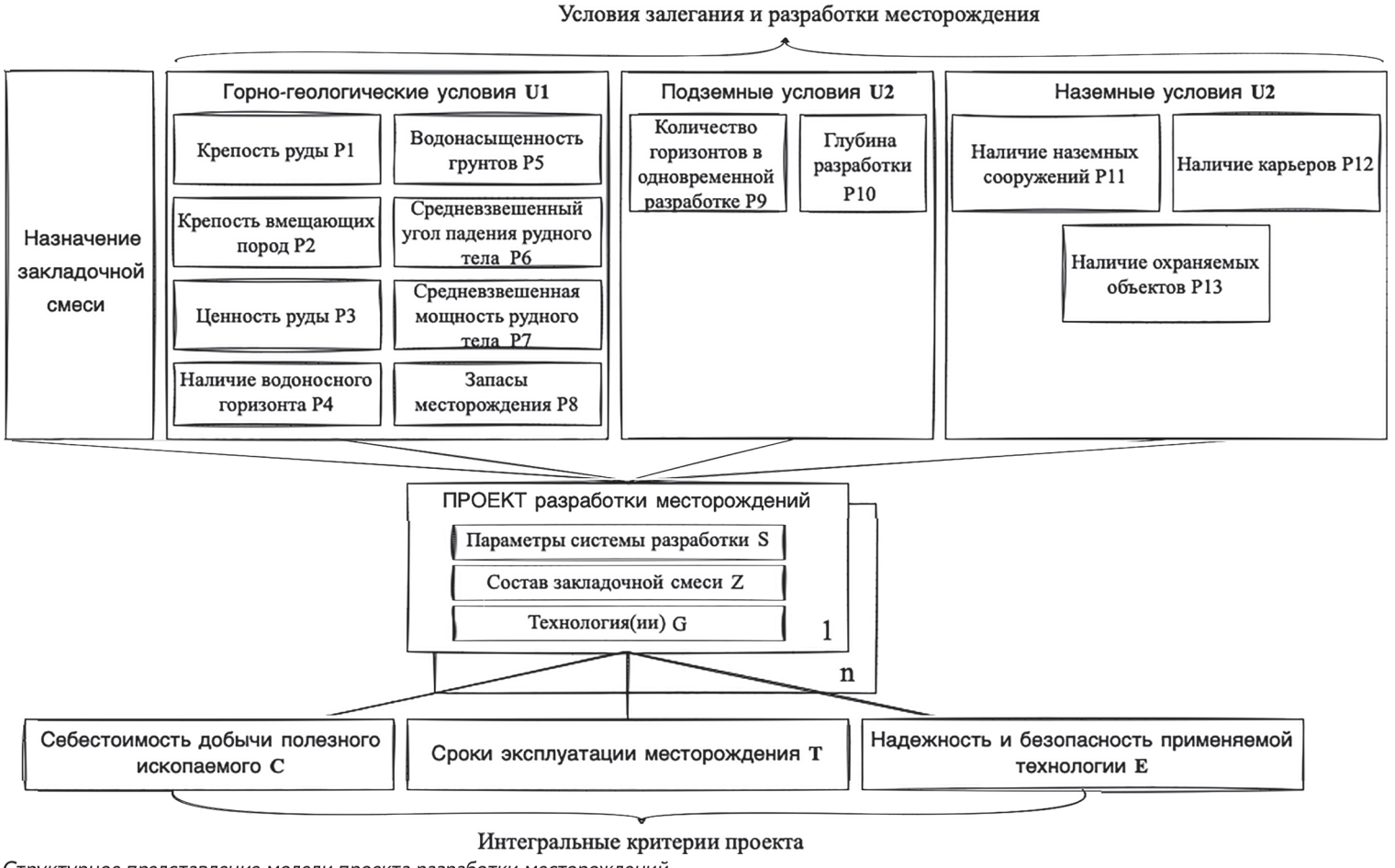
ства вариантов из предложенных конструктивно-технологических решений. При помощи алгоритма дается точное и понятное предписание для решения простых или сложных задач, которые разбиваются на последовательные шаги или действия [26]. Для процедуры анализа параметров закладки и состава закладочной смеси понятие «проект» было обобщено и создана общая формализованная модель для принятия решения.

Без учета всех достаточно значимых технико-экономических показателей не обойтись при создании метода интегральной оценки проектных решений. Учет технико-экономических показателей является необходимым при использовании методологических, алгоритмических и математических методов в геотехнологии [27]. Разработка алгоритма позволит исключить предвзятость, производить выбор, исключая субъективное мнение одного человека или проектной организации, что улучшит качество выполненного проекта.

Выносимое заключение проектного решения должно быть в высокой степени надежным и объективным, что представляется весьма сложной задачей в части экспертизы технологической и экономической составляющих данного проекта. Все это требует выявления и установления зависимостей между экономическими, технологическим и горно-геологическим резюмирующими параметрами и характеристиками сравниваемого проекта с идеальным (эталонным) проектом или с параметрами, зафиксированными на действующих горнодобывающих предприятиях, имеющих наилучшие показатели. Данная методика призвана обеспечить помощь в поиске расхождений с общепринятыми и допустимыми систематическими и последовательными нормами расчета технологических и экономических положений. Невозможно дать оценку экономическому потенциалу и долгосрочным прогрессивным перспективам проектных решений без их сопоставления с идеальными (эталонными) [28].

Сравнительный метод является наиболее простым способом выбора оптимального варианта, который используется в различных областях [29]. От сравниваемых объектов нет необходимости требовать достаточно четкой схожести их горно-геологических условий. Но при этом для более точного и детального раскрытия истинных преимуществ технико-экономических показателей и технологических решений необходимо принимать во внимание и сравнивать в меру однотипные горнодобывающие предприятия [30].

На основе оценки применяемых технологий был произведен анализ параметров закладки и применяемых составов закладочной смеси, а также влияния условий залегания рудных тел и разработки месторождений на параметры закладки и состав закладочной смеси. В результате были выделены тринадцать параметров (факторов) условий залегания и разработки месторождений, в наибольшей степени оказывающих влияние на выбор конструктивно-технологических значений, параметров закладки и выбор состава закладочной смеси: горно-геологические условия (U_1) — крепость руды (P_1), крепость вмещающих пород (P_2), ценность руды (процентное содержание полезного компонента в руде) (P_3), наличие водоносного горизонта (P_4), водонасыщенность грунтов (P_5), средневзвешенный угол падения рудного тела (P_6), средневзвешанная мощность рудного тела (P_7), запасы месторождения (P_8); подземные условия (U_2) — количество горизонтов в одновременной разработке (P_9), глубина разработки (P_{10}); наземные условия (U_3) — наличие наземных сооружений (P_{11}), наличие карьера (P_{12}), наличие охраняемых объектов (P_{13}).



Структурное представление модели проекта разработки месторождений
Structural performance of mineral mining project model

Важнейшими интегральными показателями применения определенной технологии извлечения традиционно считаются сроки эксплуатации месторождения (T) и себестоимость добычи полезного ископаемого (C). В связи с возросшими в последнее время требованиями к экологической составляющей добычи полезного ископаемого в качестве важнейшего показателя выступает надежность и безопасность (технологическая и экологическая) применяемой технологии (E) на конкретном месторождении.

Содержание проектного решения представлено структурной моделью проекта на рисунке.

Таким образом, каждый проектный вариант (D) можно представить в виде следующей информационной структуры:

$$D_i\{U_{1i}, U_{2i}, U_{3i}, S_i, Z_i, G_i, C_i, T_i, E_i\}, \quad (1)$$

где U_{1i}, U_{2i}, U_{3i} — множество значений параметров, характеризующих конкретную технологию разработки месторождений; S_i — параметры системы разработки; Z_i — состав закладочной смеси; G_i — технология или технологии, которые закладываются в основу применяемой системы; C_i, T_i, E_i — интегральные показатели системы (себестоимость добычи, сроки существования рудника, надежность и безопасность реализации) [31].

Созданные модели и алгоритмы позволят разработать программный продукт для выбора технологии и способа разработки месторождения, а впоследствии выполнить проект разработки месторождения полезного ископаемого. При наличии такой программы разрешается важная задача — объективная оценка качества выполненного проекта [32].

Несмотря на точный выбор параметров закладки и составов закладочной смеси, а также правильно выбранные «в теории» технологии разработки месторождений, на практике происходит отклонение от проектных рекомендаций, что приводит к снижению оценки надежности интегральных показателей закладки. Такая ситуация обусловливается комплексным характером этих проектов, наличием сложных взаимосвязей технологических процессов с объектами инфраструктуры, которые полностью учитываются при глубоком предварительном анализе [33]. Предлагаемая методика оценки важнейших показателей разработки (срок существования рудника, себестоимость добычи, безопасность), основанная на интеграции экспертных знаний и фактических сведений о ранее реализованных проектах, в основном базируется на построении модели зависимости интегральных параметров от параметров внешних условий, конструктивных параметров проекта и применяемой технологии [34, 35].

В алгоритмах необходимо выразить существующие соотношения между горно-геологическими, техническими, экономическими, экологическими параметрами и функциональностью проекта с «эталоном».

Противоречивость — это существенное отличие сравниваемых технико-экономических показателей в современной горнодобывающей промышленности [36]. Заурядным является принятое решение при наличии всех технико-экономических показателей, которые выше или ниже «эталонного». Нередко часть показателей превосходит «эталонный», часть — ниже. В данном случае в методике необходимо представить альтернативные сравниваемые группы в единообразной оценочной системе. Опыт, интуиция или авторитетное мнение ученых и специалистов могут не соответствовать реальным зависимостям в сравниваемом проекте с «эталонным». Сравнение с уже действующими рудниками невозможно, так как точной аналогии не существует. Следовательно, понять, какой из факторов закладываемых гор-

но-геологический условий в большей или меньшей мере влияет на технико-экономические показатели, затруднительно.

Опираясь на имеющиеся теории решения сложной задачи, основанной на методе мультикритериальной эффективности, предложен метод интегративной оценки, названный методом суммарных среднеквадратных весовых отклонений [37], а также для каждого фактора предложено ввести коэффициент относительной важности. Коэффициент относительной важности необходим для увеличения или уменьшения влияния данного фактора в алгоритме.

Представить интегральный показатель, отражающий полную объективную независимость интегральной оценки, в полной мере невозможно ввиду необходимости учета несхожих по значимости и актуальности индивидуальных технико-экономических характеристик. В каждом из сравниваемых проектов будут иметься различные относительно значимые оценочные характеристики отклонения от «эталона», которые будут сравнимы с отклонениями совершенно иных характеристик в других проектных решениях, например: отклонение по себестоимости продукции может свободно компенсироваться равным по величине снижением или увеличением сметной стоимости всего проекта. Следовательно, для оптимального решения чрезвычайно важной задачи отбора в наибольшей степени эффективного проектного решения в числе ему подобных необходимо учитывать индивидуальные показатели эффективности с привязкой к их неодинаковой относительной важности, принимая во внимание условную величину отклонений.

При рядовых методах сравнительного анализа и экспертизы проектного решения необходимо обосновывать критерий значимости индивидуальных технико-экономических показателей. При этом до настоящего времени не определены критерии оценки и отсутствует общее, единообразное компетентное мнение (численный коэффициент мнения), учитывающее первостепенность, наибольшую значимость одного показателя перед другим. Необходимо учитывать, что глобальные, всеохватывающие рекомендации для всех рассматриваемых вариантов отсутствуют. Но это не является фактором, тормозящим или делающим невозможным интегральную оценку эффективности проектного решения. В одних регионах при строительстве горнодобывающего предприятия имеется существенный дефицит рабочей силы, и необходимо достичь наибольшей производительности труда, в других — снижения срока строительства горнодобывающего предприятия при увеличении его производственной мощности, например, в условиях возросшего потребления данного сырья на мировом рынке.

Кроме нормативно-определяющих данных, выявляя приоритет или важность того или иного показателя над остальными, необходимо использовать какую-либо базисно-фундаментальную информацию. Данная информация может поступать по различным каналам и описывать комплексный объем сведений, хранящийся в памяти, обобщать имеющийся опыт, использовать накопленные знания, применяя при этом индивидуальную шкалу оценок, носящих интуитивно-индивидуальный характер. При количественно-качественной оценке категории значимости возможно применение различных методов, но наиболее подходящим является метод экспертных оценок. Коэффициент значимости отдельного показателя имеет индивидуально-интуитивное, оценочное значение для каждого эксперта. Обработав полученную экспертно-оценочную информацию, можно определить коэффициент

значимости (функцию полезности или степень важности) основополагающих технико-экономических показателей в совокупности с величиной совпадения мнений группы экспертов. Следовательно, имея мнение экспертов и используя функцию (2) возможно вычислить достоверные значения коэффициентов значимости технико-экономических показателей эффективности φ

$$\varphi_{y\partial i} = \frac{\varphi_i}{\varphi_{cp}} = \frac{\varphi_i}{\frac{\sum_{i=1}^{m} \varphi_i}{m}} = \frac{m\varphi_i}{\sum_{i=1}^{m} \varphi_i} \quad . \qquad (2)$$

Таким образом, определяется четкое значение коэффициента показателя эффективности и ликвидируется подчиненность диапазонно-бального оценочного суждения (например, от 3 до 10 или от Н до Я).

$$K_{инт.j} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\delta_{ij} \frac{\varphi_i}{\varphi_{cp}} \right)^2} = \frac{1}{\varphi_{cp}} \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\delta_{ij} \varphi_i \right)^2} \, , \qquad (3)$$

где φ_i — коэффициент значимости технико-экономических показателей эффективности *i*-го показателя значимости горно-геологической характеристики или эффективности проекта;

$\varphi_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \varphi_i}{m}$ — средний коэффициент значимости технико-экономических показателей эффективности по всем функциональным параметрам эффективности проектного решения или технологичности горно-геологических условий; *m* — число разграничивающих показателей эффективности проектного решения или технологичности горно-геологических условий, допустимых для окончательного анализа; $\varphi_i / \varphi_{ср}$ — коэффициент значимости технико-экономических показателей эффективности *i*-го показателя в сравнении со средневзвешенной полезностью *m* показателей, допустимых для окончательного анализа.

Ввиду наличия различных комплексов экономических и производственно-технических показателей интегральный показатель необходимо фиксировать отдельно для каждого из них $K^{пт}_{инт.j}$ и $K^{эк}_{инт.j}$.

Но при этом необходимо учитывать, что наиболее точно отражает совокупность всех характеристик фиксированный обобщающий интегральный показатель, а именно, технологичность горно-геологических условий горнодобывающих предприятий, следовательно, приоритетной и значимой задачей является расчет фиксировано обобщающего интегрального показателя $K_{инт.j}$. Учитывая совокупно-количественную характеристику горно-геологических условий предприятия, можно сделать вывод, что конечный комплексный результат представляет синтез решений по частным экономическим и техническим показателям. При этом возникает альтернативно-объективная возможность более детального анализа одного проектного решения разработки горнодобывающего предприятия при возможности существования нескольких векторов, критериев или аспектов оценки.

Выводы

Для исключения подчиненности диапазонно-бального оценочного суждения необходимо вычислить достоверные значения коэффициентов значимости технико-экономических показателей эффективности, которые возможно использовать с привязкой к неодинаковой относительной важности условной величины отклонений для оптимального решения чрезвычайно важной задачи — отбора в наибольшей степени эффективного проектного решения.

Следовательно, вероятностные расхождения проектных решений с показателями «эталонных» приобретают обоюдно отличительный вес, значимость и

полезность. Коэффициенты значимости технико-экономических показателей эффективности рассчитываются единожды, и полученные значения могут использоваться достаточно длительное время, до момента изменения критериев оценки, новых технологических изменений в геотехнологии, то есть до пополнения и приобретения новых знаний и экспертного опыта.

Заключение

Использование разработанной методики и алгоритмов позволит создать программный продукт, который на первоначальных этапах сможет оказать существенную помощь в проектировании, а впоследствии, возможно, сумеет самостоятельно осуществлять выбор и проектирование закладочной смеси. Внедренный программный инструмент, который произведет сравнительную оценку интегральных показателей параметров закладки и состава смеси, позволит уже на начальных этапах подбора состава закладочной смеси оценить и выбрать тот вариант, который обеспечит повышение эффективности и безопасности разработки месторождения полезного ископаемого.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A.* Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information // Sensors. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.

2. *Хайрутдинов М. М.*, *Конгар-Сюрюн Ч. Б.*, *Хайрутдинов А. М.*, *Тюляева Ю. С.* Повышение безопасности при извлечении водорастворимых руд путем оптимизации параметров закладочного массива // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 1. — С. 53 — 59. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-01-53-59.

3. *Myaskov A., Temkin I., Deryabin S., Marinova D.* Factors and objectives of sustainable development at the implementation of digital technologies and automated systems in the mining industry // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, article 04023. DOI: 10.1051/e3sconf/202017404023.

4. *Sychev A. E.*, *Zaytseva E. V.*, *Tolkachyov P. S.* Economic digitalization: contradictions and prospects // Studies in Systems, Decision and Control. 2021, vol. 314, pp. 353–359. DOI: 10.1007/978-3-030-56433-937.

5. *Голик В. И., Дмитрак Ю. В., Габараев О. З., Кожиев Х. Х.* Минимизация влияния горного производства на окружающую среду // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22. — № 6. — С. 26 — 29. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-26-29.

6. *Кашников Ю. А.*, *Ермашов А. О.*, *Ефимов А. А.* Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. — 2019. — Т. 237. — С. 259–267. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259.

7. *Голик В. И., Дмитрак Ю. В., Комащенко В. И., Разоренов Ю. И.* Экологические аспекты хранения хвостов обогащения руд в горном регионе // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22. — № 6. — С. 35 — 39. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-35-39.

8. *Grayson R. L.* Addressing the dual challenges of meeting demand for minerals and sustainable development // Minerals. 2011, vol. 1, no. 1, pp. 1 — 2. DOI: 10.3390/min1010001.

9. *Ловчиков А. В.* Горно-тектонические удары на Ловозерском редкометальном месторождении // Вестник Мурманского государственного технического университета. Науки о Земле и смежные экологические науки. — 2008. — Т. 11. — № 3. — С. 385 — 392.

10. *Маловичко А. А.*, *Блинова Т. С.*, *Лебедев А. Ю.*, *Некрасова Л. В.* Соликамское землетрясение 5 января 1995 г. / Проблемы безопасности при отработке месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: Материалы международного симпозиума SPM-95. — Екатеринбург: УрО РАН, 1997. — С. 307–315.

11. *Адигамов А. Э.*, *Юденков А. В.* Модель напряженно-деформированного состояния нарушенного породного массива с учетом анизотропии и неоднородностей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 8. — С. 93–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_93.

12. *Herbut A., Khairutdinov M. M., Kongar-Syuryun Ch., Rybak J.* The surface wave attenuation as the effect of vibratory compaction of building embankments // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 362, no. 1, article 012131. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012131.

13. *Dobrzycki P., Kongar-Syuryun Ch., Khairutdinov A.* Vibration reduction techniques for Rapid Impulse Compaction (RIC) // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1425, no. 1), 012202. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012202.

14. *Хайрутдинов М. М.*, *Конгар-Сюрюн Ч. Б.*, *Тюляева Ю. С.*, *Хайрутдинов А. М.* Планетная технология. Предпосылки формирования новой научной дисциплины // Горная промышленность. — 2020. — № 3. — С. 113–120. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-3-113-120.

15. *Gugunskiy D., Chernykh I., Khairutdinov A.* Legal models for activities on the exploration and utilization of space resources: Towards the «Space-2030» agenda // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020, vol. 1100 AISC, pp. 657 — 664. DOI: 10.1007/978-3-030-39319-973.

16. *Khayrutdinov A.* Current issues of mining activities on celestial bodies: International law aspects // The Advances in the Astronautical Sciences. 2020, vol. 170, pp. 895–902.

17. *Khairutdinov A., Tyulyaeva Y., Kongar-Syuryun Ch., Rybak A.* Extraction of minerals on celestial bodies as a new scientific direction // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012004.

18. *Хайрутдинов А. М.*, *Конгар-Сюрюн Ч. Б.*, *Kowalik T.*, *Тюляева Ю. С.* Управление напряженно-деформационным состоянием массива горных пород путем формирования разнопрочностной закладки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 42–55. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-42-55.

19. *Kowalik T., Ubysz A.* Waste basalt fibers as an alternative component of fiberconcrete // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 38, pp. 2055 — 2058. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.140.

20. *Lyashenko V. I.*, *Khomenko O. E.*, *Golik V. I.* Friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses // Mining Science and Technology (Russian Federation). 2020, vol. 5, no. 2, pp. 104 — 118. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-104-118.

21. *Papán D., Valašková V., Drusa M.* Numerical and experimental case study of blasting works effect // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016, vol. 44, no. 5, article 052052. DOI: 10.1088/1755-1315/44/5/052052.

22. *Мельник В. В.*, *Васючков Ю. Ф.* Принципы повышения безопасности при разработке угольных месторождений // Безопасность труда в промышленности. — 2016. — № 8. — С. 51 — 54.

23. *Ivannikov A., Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K.* Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 38, pp. 2059 — 2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.

24. *Кононов А. В.*, *Гончаренко С. Н.*, *Асанов Д. А.*, *Масленников О. О.* Исследование ультразвукового воздействия на ионообменные процессы при производстве урана методом подземного скважинного выщелачивания // Цветные металлы. — 2020. — № 4. — С. 50–57. DOI: 10.17580/tsm.2020.04.06.

25. *Vinnikov V. A.*, *Silberschmidt M. G.*, *Bocharov V. A.*, *Ignatkina V. A.*, *Gzogyan T. N.* Environmental resource — Economized processes of recycling mineral raw materials of complex composition // Environment, Technology, Resources. 2015, vol. 1, pp. 209–215. DOI: 10.17770/etr2013vol1.837.

26. *Кузиев Д. А.*, *Пятова И. Ю.*, *Клементьева И. Н.*, Пихторинский Д. Алгоритм определения максимальной мощности привода подачи карьерного бурового станка // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 1. — С. 128–133. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-128-133.

27. *Khairutdinov A., Ubysz A., Adigamov A.* The concept of geotechnology with a backfill is the path of integrated development of the subsoil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 684, no. 1, article 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012007.

28. *Куприянов В. В.*, *Бондаренко И. С.* Обеспечение безопасности железнодорожных перевозок промышленных грузов на горнодобывающих предприятиях // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 4. — С. 56 — 62. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-4-56-62.

29. *Evsukov S. G., Sigarev A. V., Ustyuzhanina E. V., Zaytseva E. V.* Comparative analysis of pricing policies in the market for network goods // Journal of Internet Banking and Commercethis. 2016, vol. 21, no. S6.

30. *Kim M. L.*, *Pevzner L. D.*, *Temkin I. O.* Development of automatic system for unmanned aerial vehicle (UAV) motion control for mine conditions // Mining Science and Technology (Russian Federation). 2021, vol. 6, no. 3, pp. 203 — 210. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-203-210.

31. *Куприянов В. В.*, *Бондаренко И. С.* Применение нечеткой логики для оценки достоверности моделей краткосрочного прогноза состояния горношахтного оборудования // Горный журнал. — 2021. — № 5. — С. 75–79. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.08.

32. *Klimov I. Yu.* Analysis of soft skills-based approach effectiveness in advanced training program for mining company // Mining Science and Technology (Russian Federation). 2020, vol. 5, no. 1, pp. 56 — 68. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-56-68.

33. *Temkin I., Klebanov D., Deryabin S., Konov I.* Predictive analytics in mining. dispatch system is the core element of creating intelligent digital mine // Communications in Computer and Information Science. 2020, 1201 CCIS, pp. 365–374. DOI: 10.1007/978-3-030-46895-828.

34. *Томилин А. В.* Создание технико-экономического обоснования при проектировании подземных сооружений с использованием экспертных систем // Естественные и технические науки. — 2016. — № 4(94). — С. 228 — 232.

35. *Кудяков В. А.*, *Минаев Н. Н.*, *Копаница Н. О.*, *Жарова Е. А.* Технико-экономическое обоснование инфраструктурных проектов в производстве строительных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2015. — № 1. — С. 235 — 239.

36. *Vostrikov A. V.*, *Prokofeva E. N.*, *Goncharenko S. N.*, *Gribanov I. V.* Analytical modeling for the modern mining industry // Eurasian Mining. 2019, no. 2019, no. 2, pp. 30–35. DOI: 10.17580/em.2019.02.07.

37. *Малкин А. С.* Разработка методов поэтапного проектирования оптимизации параметров и интегральной оценки проектов угольных шахт: Дис. ... докт. техн. наук — М.: МГИ, 1972. — 321 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Temkin I., Myaskov A., Deryabin S., Konov I., Ivannikov A. Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 18, article 6277. DOI: 10.3390/s21186277.

2. Khairutdinov M. M., Kongar-Suryun Ch. B., Khairutdinov A., Tyulyaeva Yu. S. Improving safety in the extraction of water-soluble ores by optimizing the parameters of the laying array.

Occupational Safety in Industry. 2021, no. 1, pp. 53 — 59. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-01-53-59.

3. Myaskov A., Temkin I., Deryabin S., Marinova D. Factors and objectives of sustainable development at the implementation of digital technologies and automated systems in the mining industry. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 174, article 04023. DOI: 10.1051/e3sconf/202017404023.

4. Sychev A. E., Zaytseva E. V., Tolkachyov P. S. Economic digitalization: contradictions and prospects. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021, vol. 314, pp. 353–359. DOI: 10.1007/978-3-030-56433-937.

5. Golik V. I., Dmytrak Yu. V., Gabaraev O. Z., Kozhiev Kh. Kh. Minimizing the impact of mining on the environment. *Ecology and Industry of Russia*. 2018, vol. 22, no. 6, pp. 26 — 29. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-26-29.

6. Kashnikov Yu. A., Ermashov A. O., Efimov A. A. Geological and geomechanical model of Verkhnekamsk potash deposit site. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 237, pp. 259–267. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259.

7. Golik V. I., Dmytrak Yu. V., Komashchenko V. I., Razorenov Yu. I. Environmental aspects of storing tails of ore dressing in a mountain region. *Ecology and Industry of Russia*. 2018, vol. 22, no. 6, pp. 35 — 39. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-35-39.

8. Grayson R. L. Addressing the dual challenges of meeting demand for minerals and sustainable development. *Minerals*. 2011, vol. 1, no. 1, pp. 1 — 2. DOI: 10.3390/min1010001.

9. Lovchikov A. V. Mine-tectonic rock bursts at the lovozersky rare-metal deposit. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o Zemle i smezhnye ekologicheskie nauki*. 2008, vol. 11, no. 3, pp. 385 — 392. [In Russ].

10. Malovichko A. A., Blinova T. S., Lebedev A. Yu., Nekrasova L. V. Solikamsk earthquake on January 5, 1995. *Problemy bezopasnosti pri otrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh v zonakh gradopromyshlennykh aglomeraciy: Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma SPM-95* [Safety problems during mining of mineral deposits in the zones of urban agglomerations: Materials of the international symposium SPM-95], Ekaterinburg, UrO RAN, 1997, pp. 307–315. [In Russ].

11. Adigamov A. E., Yudenkov A. V. Stress–strain behavior model of disturbed rock mass with regard to anisotropy and discontinuities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 8, pp. 93–103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_93.

12. Herbut A., Khairutdinov M. M., Kongar-Syuryun Ch., Rybak J. The surface wave attenuation as the effect of vibratory compaction of building embankments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 362, no. 1, article 012131. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012131.

13. Dobrzycki P., Kongar-Syuryun Ch., Khairutdinov A. Vibration reduction techniques for Rapid Impulse Compaction (RIC). *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1425, no. 1), 012202. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012202.

14. Khayrutdinov M. M., Kongar-Syuryun Ch. B., Tyulyaeva Yu. S., Khayrutdinov A. M. Planetary technology. Prerequisites for the formation of a new scientific discipline. *Russian Mining Industry*. 2020, no. 3, pp. 113–120. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-3-113-120.

15. Gugunskiy D., Chernykh I., Khairutdinov A. Legal models for activities on the exploration and utilization of space resources: Towards the «Space-2030» agenda. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, vol. 1100 AISC, pp. 657 — 664. DOI: 10.1007/978-3-030-39319-973.

16. Khayrutdinov A. Current issues of mining activities on celestial bodies: International law aspects. *The Advances in the Astronautical Sciences*. 2020, vol. 170, pp. 895–902.

17. Khairutdinov A., Tyulyaeva Y., Kongar-Syuryun Ch., Rybak A. Extraction of minerals on celestial bodies as a new scientific direction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012004.

18. Khayrutdinov A. M., Kongar-Syuryun Ch. B., Kowalik T., Tyulyaeva Yu. S. Stress–strain behavior control in rock mass using different-strength backfill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 42–55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-42-55.

19. Kowalik T., Ubysz A. Waste basalt fibers as an alternative component of fiberconcrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, pp. 2055 — 2058. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.140.

20. Lyashenko V. I., Khomenko O. E., Golik V. I. Friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining Science and Technology (Russian Federation)*. 2020, vol. 5, no. 2, pp. 104 — 118. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-104-118.

21. Papán D., Valašková V., Drusa M. Numerical and experimental case study of blasting works effect. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2016, vol. 44, no. 5, article 052052. DOI: 10.1088/1755-1315/44/5/052052.

22. Melnik V. V., Vasyuchkov Yu. F. Principles for improving safety in the development of coal deposits. *Occupational Safety in Industry*. 2016, no. 8, pp. 51 — 54.

23. Ivannikov A., Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K. Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, pp. 2059 — 2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.

24. Kononov A. V., Goncharenko S. N., Assanov D. A., Maslennikov O. O. Research studying of ultrasonic effects on ion-exchange processes in uranium production by the in-situ leaching method. *Tsvetnye Metally*. 2020, no. 4, pp. 50–57. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2020.04.06.

25. Vinnikov V. A., Silberschmidt M. G., Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Gzogyan T. N. Environmental resource — Economized processes of recycling mineral raw materials of complex composition. *Environment, Technology, Resources*. 2015, vol. 1, pp. 209–215. DOI: 10.17770/etr2013vol1.837.

26. Kuziev D. A., Pyatova I. Yu., Klement'eva I. N., Pikhtorinskiy D. Algorithm for the determination of maximum feed drive power of drilling rigs in open pit mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 1, pp. 128–133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-128-133.

27. Khairutdinov A., Ubysz A., Adigamov A. The concept of geotechnology with a backfill is the path of integrated development of the subsoil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 684, no. 1, article 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012007.

28. Kupriyanov V. V., Bondarenko I. S. Ensuring safety of industrial cargo by rail transportation at the mining enterprises. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 4, pp. 56 — 62. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-4-56-62.

29. Evsukov S. G., Sigarev A. V., Ustyuzhanina E. V., Zaytseva E. V. Comparative analysis of pricing policies in the market for network goods. *Journal of Internet Banking and Commercethis*. 2016, vol. 21, no. S6.

30. Kim M. L., Pevzner L. D., Temkin I. O. Development of automatic system for unmanned aerial vehicle (UAV) motion control for mine conditions. *Mining Science and Technology (Russian Federation)*. 2021, vol. 6, no. 3, pp. 203 — 210. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-203-210.

31. Kupriyanov V. V., Bondarenko I. S. Fuzzy logic in reliability assessment of short-term forecast models for mining equipment. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 5, pp. 75–79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.08.

32. Klimov I. Yu. Analysis of soft skills-based approach effectiveness in advanced training program for mining company. *Mining Science and Technology (Russian Federation)*. 2020, vol. 5, no. 1, pp. 56 — 68. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-56-68.

33. Temkin I., Klebanov D., Deryabin S., Konov I. Predictive analytics in mining. dispatch system is the core element of creating intelligent digital mine. *Communications in Computer and Information Science*. 2020, 1201 CCIS, pp. 365–374. DOI: 10.1007/978-3-030-46895-828.

34. Tomilin A. V. Creation of a feasibility study for the design of underground structures using expert systems. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2016, no. 4(94), pp. 228 — 232. [In Russ].

35. Kudyakov V. A., Minaev N. N., Kopanitsa N. O., Zharova E. A. Feasibility study of infrastructure projects on construction material production. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2015, no. 1, pp. 235 — 239. [In Russ].

36. Vostrikov A. V., Prokofeva E. N., Goncharenko S. N., Gribanov I. V. Analytical modeling for the modern mining industry. *Eurasian Mining*. 2019, no. 2019, no. 2, pp. 30–35. DOI: 10.17580/em.2019.02.07.

37. Malkin A. S. *Razrabotka metodov poetapnogo proektirovaniya optimizatsii parametrov i integral'noy otsenki proektov ugol'nykh shakht* [Development of methods for step-by-step design optimization of parameters and integral assessment of coal mine projects], Doctor's thesis, Moscow, MGI, 1972, 321 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каунг Пьей Аунг[1] — канд. техн. наук, докторант,
e-mail: kaungpyae05@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-0123-7176,
Зотов Василий Владимирович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: zotov.vv@misis.ru,
Гаджиев Магомед Абубакарович[1] — аспирант,
e-mail: gadjiev.ma@edu.misis.ru,
Артемов Станислав Игоревич[1] — аспирант,
e-mail: artemov.si@edu.misis.ru,
Гиреев Илез Аюпович[1] — аспирант,
e-mail: gireev.ia@edu.misis.ru,
[1] НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Каунг Пьей Аунг, e-mail: kaungpyae05@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kaung Pyae Aung[1], Cand. Sci. (Eng.),
Doctoral Candidate, e-mail: kaungpyae05@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0003-0123-7176,
V.V. Zotov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: zotov.vv@misis.ru,
M.A. Gadzhiev[1], Graduate Student,
e-mail: gadjiev.ma@edu.misis.ru
S.I. Artemov[1], Graduate Student,
e-mail: artemov.si@edu.misis.ru
I.A. Gireev[1], Graduate Student,
e-mail: gireev.ia@edu.misis.ru
[1] National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: Kaung Pyae Aung , e-mail: kaungpyae05@gmail.com.

Получена редакцией 24.11.2021; получена после рецензии 10.12.2021; принята к печати 10.01.2022.
Received by the editors 24.11.2021; received after the review 10.12.2021; accepted for printing 10.01.2022.