REFERENCES

1. Abidov K.G., Gafurova M.O. Elektr magnit maydon asosida sanoat oqova suvlarni tozalashning ekologik usuli va energiya samaradorligi // Jahon miqyosida yashil iqtisodiyot va to‘rtinchi sanoat inqilobi doirasida qayta tiklanuvchi energetikaning roli: innovatsiyalar, texnologiyalar va barqaror rivojlanishni ta’minlash. Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. – Toshkent. 2025. 431-434 bet.

2. Абидов К.Г., Гафурова М.О. Системы для очистки сточных вод магнитным полем // Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. Махсус сон № 87. 2024. – С.479-490. (05.00.00; №21);

3. Abidov K.G., Gafurova M.O. Modeling of the electromagnetic field in the process of water purification // Konchilik mashinalari va texnologiyalari. – Toshkent: TDTU, 2024. – №2(8). – B. 73–79.

4. Абидов К.Г., Гафурова М.О. Исследование переходных процессов в устройствах систем управления // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы систем электроснабжения». – ТГТУ–КГУ, 2024. – С. 106–113.

5. Халиков А.А., Колесников И.К., Нормухамедов А.А., Айнакулов Э.В. Электромагнитная технология очистки и обеззараживания воды // Материалы конференции АСИНТЕХ–2007. – Астрахань, 2007. – С. 244–247.

6. Abidov K.G., Gafurova M.O. Electromagnetic field model as a source of water cavitation energy // Technical science and innovation, Toshkent, TSTU 2024. -№1/2024. P. 51-56. (05.00.00; №16);

7. Gafurova M.O. Mathematical modeling of the start-up sequence of a wastewater treatment system: integration of physicochemical processes // Modern American journal of engineering, technology and innovation. Vol. 1, Iss.8. 2025. – P.146-152. (ResearchBib:10.35).

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Gafurova Mexrnoz Odiljonovna	—	PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering, Faculty of Energy Engineering; Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan. E-mail: gafurova.mexrnoz@mail.ru ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-7612-8221

ГЕОТЕХНИЧЕСКАЯ БЛОЧНАЯ МОДЕЛЬ ГЛУБОКОГО КАРЬЕРА: СТРУКТУРА, МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ АТРИБУТОВ И ОЦЕНКА ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО РИСКА

[1]Каримов Ш. В., [1]Каршибоев З. Ж., [2]Каршибоева М. У.

[1]Алмалыкский филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Алмалык, Узбекистан.

[2]Алмалыкский горно-металлургический комбинат, Алмалык, Узбекистан.

Doi: 10.5281/zenodo.23663926

АННОТАЦИЯ

Предложена геотехническая блочная модель глубокого карьера — расширение классической геолого-экономической блочной модели, в котором каждый элементарный блок наделяется полным набором геомеханических характеристик. Концепция модели построена на трёх принципах: единстве пространственной основы, иерархии выводимых атрибутов и разделении атрибутов по характеру изменчивости во времени. Разработаны методики формирования первичных атрибутов — литологического состава на основе индикаторного кригинга с сохранением долей литотипов для смешанных блоков, индекса микротрещиноватости, объединяющего показатель RQD и характеристики состояния трещин, и объёмной интенсивности макротрещиноватости по DFN-модели. Поровое давление присваивается блокам по решению фильтрационной задачи с дифференцированными по доменам коэффициентами фильтрации. Коэффициент устойчивости рассчитывается по критерию Мора—Кулона с прочностными характеристиками, полученными по критерию Хука—Брауна, а вероятность обрушения — методом Монте-Карло. Предложена классификация

блоков по четырём уровням геотехнического риска с регламентом ведения работ для каждого класса. Модель формализована как множество блоков с вектором атрибутов, формируемым иерархическим оператором преобразования. Верификация по 64 участкам подтвердила адекватность модели: коэффициент детерминации 0,96 при средней относительной ошибке 2,7 %, точность классификации 86 % при коэффициенте Коэна 0,79; показано, что ошибки модели носят консервативный характер.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА геотехническая блочная модель, глубокий карьер, устойчивость бортов, коэффициент устойчивости, вероятность обрушения, геотехнический риск, индикаторный кригинг, RQD, геологический индекс прочности GSI, критерий Хука—Брауна, DFN-модель, объёмная интенсивность трещиноватости, поровое давление, метод Монте-Карло, индекс надёжности, классификация риска, верификация модели.

Введение

Блочная модель месторождения традиционно рассматривается как инструмент представления геолого-экономической информации: каждому элементарному блоку присваиваются содержание полезного компонента, тоннаж, технологический тип руды и экономическая ценность. Устойчивость массива при этом учитывается косвенно — через единый предельный угол откоса, задаваемый при построении контура карьера. Такой подход не позволяет учитывать пространственную изменчивость геомеханических свойств массива и не даёт возможности количественно оценить риск ведения работ в конкретной точке карьерного пространства.

С ростом глубины открытых горных работ ограниченность этого подхода становится критической. Высота бортов глубоких карьеров достигает нескольких сотен метров, в пределах которых массив пересекается литологическими контактами, зонами тектонических нарушений и участками с существенно различной трещиноватостью и обводнённостью. Осреднение геомеханических свойств по всему борту в этих условиях приводит либо к неоправданному консерватизму проектных решений, либо к недооценке риска на отдельных участках. Оба исхода имеют прямые экономические последствия: первый — через избыточные объёмы вскрышных работ, второй — через аварийные остановки и потерю подготовленных запасов.

Существующие подходы к геомеханическому обоснованию параметров бортов основаны преимущественно на расчёте общей устойчивости по характерным разрезам. Такие расчёты дают надёжный ответ на вопрос о предельных параметрах борта в целом, однако не обеспечивают пространственной привязки результата к конкретным выемочным единицам, а следовательно, не могут быть непосредственно использованы в процедурах оперативного планирования горных работ. Результаты геомеханических исследований остаются в форме экспертных заключений и разрезов, тогда как планирование оперирует блочной моделью.

Цель настоящей работы — разработать геотехническую блочную модель глубокого карьера, в которой каждый элементарный блок наделён полным набором количественных геомеханических характеристик, необходимых для оценки его устойчивости и риска отработки, и которая пригодна для непосредственного использования в алгоритмах оптимизации горных работ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: обоснование концепции и структуры модели, включая выбор размера элементарного блока и состава атрибутивных слоёв; разработка методик формирования первичных атрибутов (литологического состава, микро- и макротрещиноватости, порового давления); разработка процедуры расчёта коэффициента устойчивости и вероятности обрушения на уровне отдельного блока; построение классификации блоков по уровням геотехнического риска; математическая формализация модели и её верификация по данным натурных наблюдений.

1. Концепция и структура геотехнической блочной модели

Практическое назначение геотехнической блочной модели состоит в том, чтобы перевести геомеханическую информацию из формы экспертных заключений и разрезов в форму количественных, пространственно распределённых атрибутов, непосредственно пригодных для использования в алгоритмах оптимизации. В основу концепции положены три принципа.

Первый принцип — единство пространственной основы: все геотехнические характеристики привязываются к той же регулярной сетке блоков, что и геолого-экономические атрибуты, что обеспечивает их совместное использование в процедурах планирования без дополнительных преобразований.

Второй принцип — иерархия выводимых атрибутов: характеристики блока формируются последовательно, от первичных, определяемых

непосредственно по данным опробования и картирования, к производным, рассчитываемым на их основе. Такая иерархия обеспечивает прослеживаемость результата: для любого значения производного атрибута может быть восстановлена цепочка исходных данных, на которых оно основано.

Третий принцип — разделение атрибутов по характеру изменчивости во времени. Литологический состав и макроструктура массива практически неизменны и определяются однократно; показатели трещиноватости уточняются по мере вскрытия новых участков; поровое давление и скорости смещений изменяются непрерывно и требуют регулярной актуализации. Этот принцип определяет периодичность пересчёта атрибутов и, следовательно, вычислительную организацию модели. Общая структура модели показана на рисунке 1.



Рисунок 1. Концептуальная схема геотехнической блочной модели: иерархия формирования атрибутов и направления практического применения

Выбор размера элементарного блока представляет собой компромисс между несколькими требованиями. С одной стороны, блок должен быть достаточно малым, чтобы отражать пространственную изменчивость геомеханических свойств; с другой — достаточно крупным, чтобы содержащийся в нём объём массива мог рассматриваться как квазиоднородная среда, к которой применимы понятия прочности массива и коэффициента устойчивости.

Нижняя граница размера блока определяется представительным объёмом элементарного массива (REV — representative elementary volume) — минимальным объёмом, при котором осреднённые характеристики перестают зависеть от размера пробы. Для трещиноватых скальных массивов REV обычно составляет 5—10 характерных размеров структурного блока. Верхняя граница определяется требованиями горного планирования: блок не должен превышать выемочную единицу. Принятые для рассматриваемого объекта параметры модели приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры геотехнической блочной модели

Параметр	Значение	Обоснование
Размер блока по X, Y	10 × 10 м	параметры БВР, сетка бурения
Размер блока по Z	15 м	высота уступа
Общее число блоков	486 тыс.	объём карьерного пространства
Средний размер структурного блока	0,8—1,4 м	данные структурного картирования
Отношение блок / структурный блок	7—12	условие применимости REV
Число атрибутивных слоёв	14	полнота геотехнического описания
Система координат	местная	согласована с маркшейдерской

Модель организована как совокупность атрибутивных слоёв, наложенных на единую сетку блоков; каждый слой содержит значения одного атрибута для всех блоков. Атрибуты разделены на три группы: первичные, формируемые непосредственно по данным опробования; производные, рассчитываемые по первичным; и динамические, актуализируемые по данным мониторинга (таблица 2).

Таблица 2

Атрибутивный состав геотехнической блочной модели

Атрибут	Обозн.	Группа	Источник	Обновление
Доли литотипов	θ(k,j)	первичный	индикаторный кригинг	при опробовании
Индекс микротрещиноватости	Iμ,j	первичный	RQD, Jr/Ja по керну	при бурении
Объёмная интенсивность	P32,j	первичный	DFN по картированию	при вскрытии
Геологический индекс прочности	GSIj	производный	формула (5)	ежеквартально
Сцепление массива	c′j	производный	критерий Хука—Брауна	ежеквартально
Угол внутреннего трения	φ′j	производный	критерий Хука—Брауна	ежеквартально
Поровое давление	uj	динамический	фильтрационная модель	ежесуточно
Коэффициент устойчивости	Fs,j	производный	формулы (15)—(16)	еженедельно
Вероятность обрушения	PoFj	производный	метод Монте-Карло	еженедельно
Класс геотехнического риска	Rj	производный	классификация (табл. 6)	еженедельно

2. Формирование первичных атрибутов

2.1. Литологический состав блока

Литологический состав является базовым атрибутом, определяющим все последующие прочностные характеристики блока. В отличие от непрерывных величин, литотип является категориальной переменной, для интерполяции которой применяется индикаторный кригинг. Для каждого литотипа k вводится индикаторная переменная, принимающая значение единицы, если проба относится к данному литотипу, и нуля в противном случае; оценка вероятности принадлежности точки к литотипу имеет вид:

$$p_k(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot l_k(x_i), \qquad l_k = 1(\text{литотип } k), \qquad l_k = 0 \text{ (иначе)} \tag{1}$$

где $p_k(x_0)$ — оценка вероятности принадлежности точки x_0 к литотипу k; λ_i — весовые коэффициенты кригинга, определяемые из системы уравнений на основе индикаторной вариограммы; $I_k(x_i)$ — значение индикаторной переменной в i-й пробе; n — число проб в окрестности оценки.

Результатом является набор вероятностей принадлежности блока к каждому из литотипов. При детерминированном подходе блоку присваивается литотип с максимальной вероятностью, что даёт чёткую границу между литологическими разностями. При вероятностном подходе сохраняются доли всех литотипов, что позволяет корректно описывать смешанные блоки на контактах. Доля литотипа в объёме блока определяется как:

$$\theta_{k,j} = \frac{V_{k,j}}{V_j}, \quad \sum_{k=1}^{K} \theta_{k,j} = 1 \tag{2}$$

где $\theta_{k,j}$ — доля k-го литотипа в j-м блоке; $V_{k,j}$ — объём, занимаемый литотипом k в блоке j; V_j — полный объём блока; K — число выделенных литотипов.

Для смешанных блоков осреднённое значение любого прочностного свойства определяется взвешиванием по долям литотипов:

$$P_j^* = \sum_{k=1}^{K} \theta_{k,j} \cdot P_k \tag{3}$$

где P_j^* — осреднённое значение свойства для j-го блока; Pk — значение свойства для k-го литотипа. Такое взвешивание корректно для аддитивных свойств (плотность, модуль деформации); для прочностных характеристик применяется взвешивание с понижающим коэффициентом, учитывающим, что прочность смешанного массива определяется преимущественно наиболее слабой составляющей.

Для рассматриваемого объекта выделено пять литотипов; доля смешанных блоков, содержащих

более одного литотипа с долей свыше 20 %, составила 14 % общего числа блоков. Такие блоки сосредоточены преимущественно вдоль контактов литологических разностей и в зоне тектонического нарушения.

2.2. Микротрещиноватость и деформационные характеристики

Под микротрещиноватостью понимается совокупность трещин, размеры которых существенно меньше размера элементарного блока и которые поэтому не могут быть описаны индивидуально, но в совокупности определяют прочность и деформируемость массива. Основным показателем, определяемым по керну разведочных скважин, служит показатель качества породы:

$$RQD = \frac{\sum L_i (L_i \geq 10\ cm)}{L_{общ}} \cdot 100\% \qquad (4)$$

где RQD — показатель качества породы, %; L_i — длина отдельных кусков керна длиной не менее 10 см; $L_{общ}$— общая длина рассматриваемого интервала бурения.

Показатель RQD характеризует степень раздробленности массива, но не учитывает состояние поверхностей трещин — их шероховатость, наличие и характер заполнителя, степень выветривания. Для комплексной оценки применяется геологический индекс прочности, связываемый с RQD и показателем состояния трещин соотношением:

$$GSI = 1{,}5 \cdot J_{cond} + \frac{RQD}{2} \qquad (5)$$

где J_{cond} — показатель состояния трещин, определяемый по классификации RMR и учитывающий шероховатость, заполнитель и выветривание. Соотношение позволяет получать оценку GSI на основе данных стандартной документации керна, что обеспечивает возможность массового определения атрибута по всему объёму модели.

Для интегральной характеристики микротрещиноватости в настоящей работе введён индекс, объединяющий количественный и качественный аспекты:

$$I_\mu = \frac{RQD}{100} \cdot \frac{J_r}{J_a} \qquad (6)$$

где J_r — показатель шероховатости трещин; J_a — показатель изменённости стенок трещин (по классификации Q-системы). Индекс изменяется в диапазоне от 0,05 для сильнонарушенного массива с глинистым заполнителем до 3,0 и более для монолитного массива с шероховатыми трещинами. Практическое значение индекса состоит в том, что он позволяет ранжировать блоки по степени структурного ослабления в пределах одного литотипа. Установлено, что в пределах домена кварц-порфиров значения индекса изменяются от 0,4 до 2,6, что соответствует изменению прочности массива в 3—4 раза при неизменной прочности породы в образце.

Деформационные характеристики массива определяются по значению GSI с использованием соотношения:

$$E_m = E_i \cdot \left(0{,}02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60 + 15D - GSI}{11}}}\right) \qquad (7)$$

где E_m — модуль деформации массива; E_i — модуль упругости ненарушенной породы; D — коэффициент нарушенности массива взрывными работами, изменяющийся от 0 для ненарушенного массива до 1 для сильно нарушенного. Наличие коэффициента D позволяет учитывать в модели различие между приконтурными блоками, подвергшимися воздействию взрыва, и блоками в глубине массива.

Для рассматриваемого объекта принято: D = 0,8 для блоков приконтурной зоны шириной один блок; D = 0,4 для второго ряда блоков; D = 0 для остального массива. Такая дифференциация отражает затухание взрывного воздействия с удалением от контура и позволяет количественно оценить эффект применения щадящих технологий контурного взрывания. Показатели микротрещиноватости по геотехническим доменам приведены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели микротрещиноватости по геотехническим доменам

Домен	RQD, %	Jcond	GSI	Iμ	Em, ГПа
I — кварц-порфиры	65—85	24—28	55—65	1,4—2,6	18—28
II — сланцы	35—55	16—20	35—45	0,6—1,2	6—12
III — зона разлома	10—30	8—12	20—30	0,05—0,3	1—3
IV — окисленные	25—45	12—16	25—35	0,3—0,8	3—7
V — гранодиориты	75—92	26—30	60—70	1,8—3,0	24—34

2.3. Макротрещиноватость и DFN-модель

Макротрещиноватость объединяет структурные нарушения, размеры которых сопоставимы с размером блока модели или превышают его: протяжённые трещины, зоны дробления, разломы. В отличие от микротрещиноватости, описываемой осреднёнными показателями, макротрещины могут и должны моделироваться индивидуально, поскольку именно они определяют кинематическую возможность структурно-обусловленных разрушений. Современным инструментом их описания является модель сети дискретных трещин (DFN — Discrete Fracture Network), в которой каждая трещина представляется как отдельный геометрический объект с заданными положением, ориентировкой и размером.

Ключевым количественным показателем DFN-модели является объёмная интенсивность трещиноватости:

$$P_{32} = \frac{\sum_i A_i}{V} \; [m^2/m^3] \qquad (8)$$

где P_{32} — объёмная интенсивность трещиноватости, м²/м³; A_i — площадь i-й трещины; V — рассматриваемый объём массива. Показатель P_{32} является объёмной характеристикой и не зависит от направления измерения, что выгодно отличает его от линейных показателей.

Непосредственное измерение P32 в натурных условиях невозможно; на практике его определяют по линейным и площадным замерам с последующим пересчётом:

$$P_{10} = \frac{N_{\text{тр}}}{L}, \qquad J_V = \sum_{s=1}^{S} \frac{1}{d_S} \qquad (9)$$

где P_{10} — линейная интенсивность трещин, 1/м; $N_{тр}$ — число трещин, пересекающих линию замера; L — длина линии замера; J_v — объёмный показатель трещиноватости, 1/м³; ds — среднее расстояние между трещинами s-й системы; S — число систем трещин.

Ориентировка трещин каждой системы описывается статистическим распределением. Наиболее употребительным является распределение Фишера, представляющее собой аналог нормального распределения на сфере:

$$f(\theta) = \frac{K \cdot sin\theta \cdot e^{kcos\theta}}{e^{k} - e^{-k}} \qquad (10)$$

где $f(\theta)$ — плотность вероятности отклонения на угол θ от среднего направления системы; к — параметр концентрации, характеризующий разброс ориентировок. Для рассматриваемого объекта значения к составили: система J_1 — 42; система J_2 — 28; система J_3 — 19, что свидетельствует о наибольшей выдержанности основной системы J_1 (таблица 4).

Таблица 4

Параметры макротрещиноватости по системам

Система	Азимут пад., град	Угол пад., град	к (Фишер)	P32, м²/м³	Протяжённость, м
J1 (основная)	250—270	65—75	42	1,8—2,6	3—12
J2	110—130	55—65	28	1,1—1,7	2—8
J3 (пологая)	310—330	25—35	19	0,6—1,1	2—6
F-1 (разлом)	230—245	70—80	—	—	> 500

Важнейшей производной характеристикой макротрещиноватости является размер структурного блока — элементарного объёма массива, ограниченного трещинами:

$$V_b = \frac{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}{sin\gamma_1 \cdot sin\gamma_2 \cdot sin\gamma_3} \qquad (11)$$

где V_b — объём структурного блока; d_1, d_2, d_3 — средние расстояния между трещинами трёх систем; γ_1, γ_2, γ_3 — углы между системами. Размер структурного блока определяет применимость модели сплошной среды: если размер блока модели превышает размер структурного блока в 7—10 раз, массив в его пределах может рассматриваться как квазисплошной.

Для рассматриваемого объекта средний объём структурного блока изменяется от 0,05 м³ в зоне тектонического нарушения до 2,7 м³ в домене гранодиоритов. При принятом размере блока модели 10 × 10 × 15 м условие применимости модели сплошной среды выполняется для всех доменов, что обосновывает корректность расчёта осреднённых прочностных характеристик.

3. Моделирование гидрогеологических условий. Поровое давление является атрибутом, оказывающим наиболее существенное влияние на устойчивость блока и при этом наиболее изменчивым во времени. Его формирование в модели требует построения фильтрационной модели массива и решения задачи о движении подземных вод к карьеру как дрене. Движение подземных вод описывается законом Дарси:

$$q = -k \cdot \nabla h \qquad (12)$$

где q — вектор скорости фильтрации; k — коэффициент фильтрации; ∇h — градиент напора. Для установившегося режима фильтрации в

неоднородной анизотропной среде уравнение движения принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial Z}\left(K_Z \frac{\partial h}{\partial Z}\right) = 0 \qquad (13)$$

где k_x, k_z — коэффициенты фильтрации по горизонтальному и вертикальному направлениям; h — напор. Решение уравнения при заданных граничных условиях (напор на контуре карьера, инфильтрационное питание, дренажные скважины) даёт распределение напора в массиве. Поровое давление в центре каждого блока определяется по рассчитанному напору:

$$U_j = \gamma_w \cdot (h_j - z_j) \qquad (14)$$

где u_j — поровое давление в j-м блоке; γ_w — удельный вес воды; h_j — напор в центре блока; z_j — вертикальная координата центра блока. Для блоков, расположенных выше депрессионной поверхности, поровое давление принимается равным нулю.

Коэффициенты фильтрации приняты дифференцированно по геотехническим доменам с учётом установленной связи между трещиноватостью и водопроницаемостью: наибольшие значения характерны для зоны тектонического нарушения, наименьшие — для монолитных гранодиоритов (таблица 5).

Таблица 5

Фильтрационные параметры по геотехническим доменам

Домен	kx, м/сут	kz, м/сут	Анизотропия kx/kz	Водоотдача
I — кварц-порфиры	0,08	0,03	2,7	0,015
II — сланцы	0,25	0,04	6,3	0,022
III — зона разлома	1,20	0,45	2,7	0,045
IV — окисленные	0,40	0,18	2,2	0,035
V — гранодиориты	0,03	0,01	3,0	0,008

Существенной особенностью гидрогеологического атрибута является необходимость его регулярной актуализации. Поровое давление изменяется вследствие работы дренажных скважин, сезонных колебаний инфильтрации и продвижения фронта горных работ. Принятая периодичность обновления — ежесуточная, по данным сети пьезометров с интерполяцией на блоки модели.

4. Расчёт коэффициента устойчивости в блочной модели

Коэффициент устойчивости является ключевым производным атрибутом, интегрирующим все ранее сформированные характеристики. Для отдельного блока он определяется как отношение предельного сопротивления сдвигу к действующему касательному напряжению:

$$F_{s,j} = \frac{c'_j + (\sigma_{n,j} - u_j) \cdot tan\varphi'_j}{\tau_j} \qquad (15)$$

где $F_{s,j}$ — коэффициент устойчивости j-го блока; c'_j, φ'_j — эффективные сцепление и угол внутреннего трения массива в блоке, определённые по критерию Хука—Брауна с использованием GSI; $\sigma_{n,j}$ — нормальное напряжение; u_j — поровое давление; τ_j — действующее касательное напряжение.

Напряжённое состояние блоков определяется численным моделированием методом конечных элементов с последующей интерполяцией компонент тензора напряжений на центры блоков. Для оценки общей устойчивости применяется процедура снижения прочности, при которой прочностные характеристики последовательно уменьшаются до потери сходимости решения:

$$c^* = \frac{c'}{SFR}, \quad tan\varphi^* = \frac{tan\varphi'}{SFR} \qquad (16)$$

где c^*, φ^* — редуцированные прочностные характеристики; SRF — коэффициент снижения прочности. Значение SRF, при котором наступает потеря устойчивости, принимается равным коэффициенту устойчивости. Результат расчёта — распределение коэффициента устойчивости по блокам приконтурной зоны — представлен на рисунке 2.

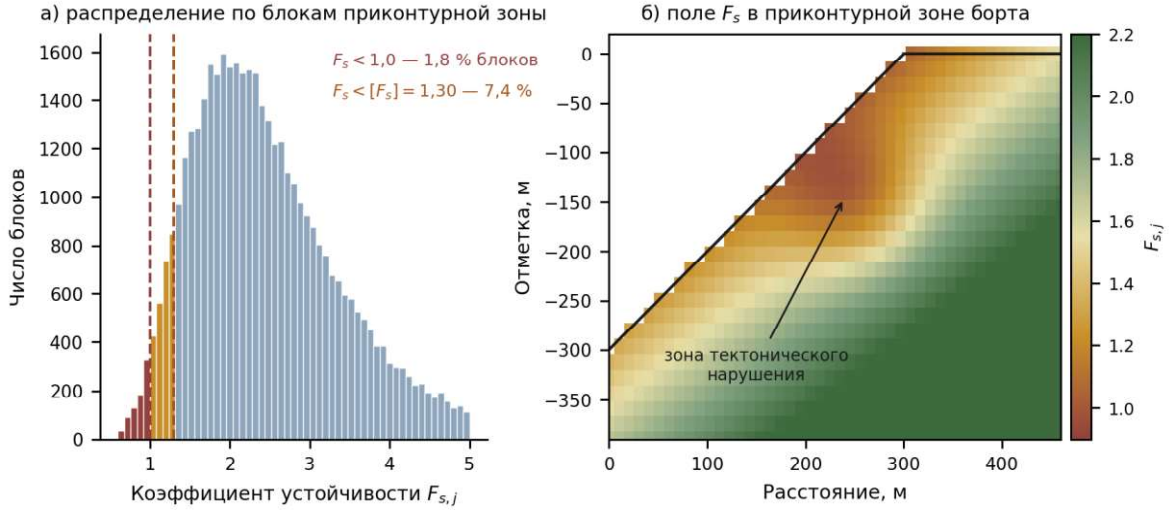


Рисунок 2. Распределение коэффициента устойчивости по блокам приконтурной зоны (а) и его пространственное поле в поперечном разрезе борта (б)

Полученная картина отражает характерные закономерности: минимальные значения коэффициента устойчивости сосредоточены у подошвы борта, где касательные напряжения максимальны, а также в блоках, отнесённых к домену тектонического нарушения. Гистограмма распределения показывает, что при принятых параметрах 7,4 % блоков приконтурной зоны имеют коэффициент устойчивости ниже нормативного значения 1,30, а 1,8 % — ниже единицы.

Принципиально важным является то, что коэффициент устойчивости блока характеризует локальную устойчивость и не заменяет расчёта общей устойчивости борта. Локально неустойчивый блок может быть удержан окружающим массивом, тогда как совокупность блоков с пониженными значениями может формировать поверхность общего обрушения. Поэтому блочные значения используются совместно с расчётом общей устойчивости: первые — для оперативного планирования и локализации проблемных зон, вторые — для обоснования параметров бортов.

5. Оценка вероятности обрушения блока

Детерминированное значение коэффициента устойчивости не отражает неопределённости исходных данных: прочностные характеристики массива определяются с существенным разбросом, а поровое давление известно лишь в точках размещения пьезометров. Для учёта этой неопределённости прочностные параметры рассматриваются как случайные величины с заданными законами распределения. Относительный разброс характеризуется коэффициентом вариации:

где σ_{F_s} — стандартное отклонение; μ_{F_s} — математическое ожидание коэффициента устойчивости. По результатам статистической обработки лабораторных испытаний приняты коэффициенты вариации: для сцепления — 0,25—0,35; для угла внутреннего трения — 0,08—0,12; для порового давления — 0,15—0,20.

Оценка вероятности обрушения выполняется методом Монте-Карло: для каждого блока генерируется большое число реализаций случайных параметров, для каждой реализации рассчитывается коэффициент устойчивости, после чего вероятность обрушения определяется как доля реализаций с коэффициентом меньше единицы:

$$PoF_j = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} I(F_{s,j}^{(n)} < 1) \qquad (18)$$

где PoF_j — вероятность обрушения j-го блока; N — число реализаций; $I(F_{s,j}^{(n)} < 1)$— индикаторная функция, принимающая значение единицы при выполнении условия и нуля в противном случае; $F_{s,j}^{(n)}$— значение коэффициента устойчивости в n-й реализации.

Распределение коэффициента устойчивости, как правило, аппроксимируется логнормальным законом, что обеспечивает неотрицательность значений:

$$(F_s) = \frac{1}{F_s \cdot \sigma_{ln} \cdot \sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{(lnF_s - \mu_{\ln})^2}{2\sigma_{ln}^2}\right] \qquad (19)$$

где $\mu_{\ln}$, $\sigma_{\ln}$ — параметры логнормального распределения. Результаты исследования сходимости метода приведены на рисунке 3.

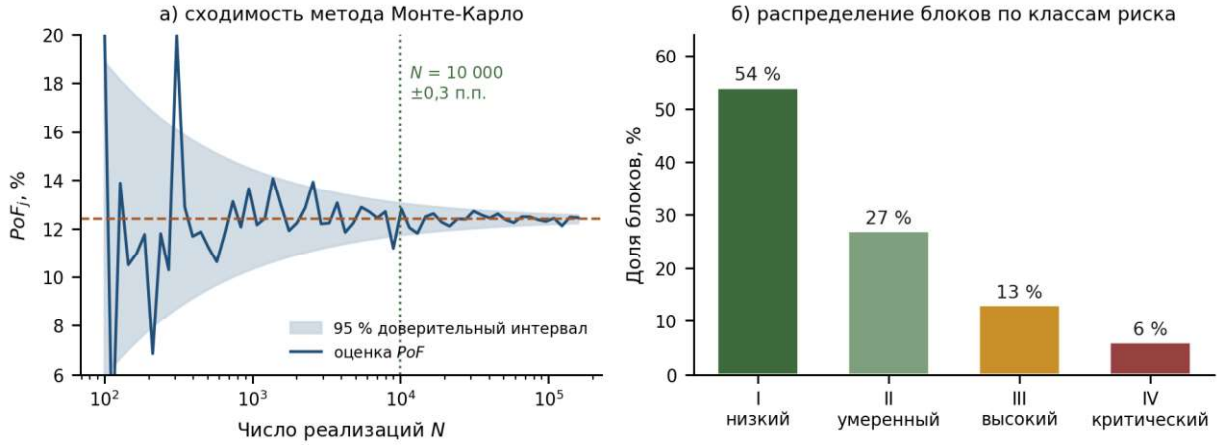


Рисунок 3. Сходимость оценки вероятности обрушения методом Монте-Карло (а) и распределение блоков приконтурной зоны по классам геотехнического риска (б)

Исследование сходимости показало, что для получения устойчивой оценки вероятности обрушения с погрешностью не более 0,3 процентных пункта достаточно 10 000 реализаций на блок. При общем числе блоков приконтурной зоны около 42 тыс. это соответствует $4{,}2 \cdot 10^8$ элементарных расчётов, что выполняется за приемлемое время при использовании упрощённой аналитической формы расчёта коэффициента устойчивости.

Наряду с вероятностью обрушения рассчитывается индекс надёжности блока, характеризующий удалённость среднего значения коэффициента устойчивости от предельного в единицах стандартного отклонения:

$$\beta_j = \frac{\mu_{F_{s,j}} - 1}{\sigma_{F_{s,j}}} \qquad (20)$$

Индекс надёжности удобен тем, что позволяет сравнивать блоки с одинаковой вероятностью обрушения, но различной степенью изученности: при равных значениях PoF предпочтителен блок с бóльшим индексом надёжности, поскольку его оценка основана на более определённых данных.

6. Классификация блоков по уровням геотехнического риска

Вероятность обрушения характеризует лишь одну сторону риска; полная оценка требует учёта тяжести возможных последствий, зависящей от того, что расположено в зоне влияния блока. Геотехнический риск блока определяется как:

$$R_j = PoF_j \cdot C_j \qquad (21)$$

где R_j — уровень геотехнического риска j-го блока; PoF_j — вероятность обрушения; C_j — тяжесть последствий, оцениваемая в баллах от 1 до 5 в зависимости от наличия в зоне влияния блока персонала, оборудования, транспортных коммуникаций и капитальных сооружений. На основе значения риска блоки классифицируются на четыре класса, для каждого из которых установлен регламент ведения работ (таблица 6).

Таблица 6

Классификация блоков по уровням геотехнического риска

Класс	PoF, %	R = PoF · C	Регламент ведения работ
I — низкий	< 5	< 10	работы без ограничений
II — умеренный	5—15	10—45	стандартный мониторинг
III — высокий	15—30	45—100	усиленный мониторинг, ограничение доступа
IV — критический	> 30	> 100	работы запрещены до стабилизации

Полученное распределение блоков по классам риска (54 % — класс I, 27 % — класс II, 13 % — класс III, 6 % — класс IV) характеризует общее геотехническое состояние карьерного пространства. Блоки классов III и IV, составляющие 19 % общего числа, сосредоточены преимущественно у подошвы западного борта и в зоне тектонического нарушения.

Практическое значение классификации состоит в том, что она преобразует непрерывные количественные оценки в дискретные управленческие категории, непосредственно определяющие допустимые действия. Это делает результаты геотехнического моделирования пригодными для использования линейным персоналом, не имеющим специальной подготовки: карта классов риска доводится до горных мастеров в составе сменного задания.

Существенно, что классификация носит динамический характер: при изменении порового давления вследствие работы дренажа или при изменении конфигурации горных работ класс блока пересчитывается. Установлено, что после завершения опережающего дренажа западного борта доля блоков класса IV в этом секторе снизилась с 23 % до 7 %, что подтверждает

эффективность дренажа как средства управления геотехническим риском.

7. Верификация модели

Верификация выполнена по двум независимым направлениям: сопоставление расчётных значений коэффициента устойчивости с фактическими, полученными обратным анализом деформирующихся участков, и проверка корректности классификации блоков по риску путём сопоставления прогноза с фактически наблюдавшимися событиями (рисунок 4).

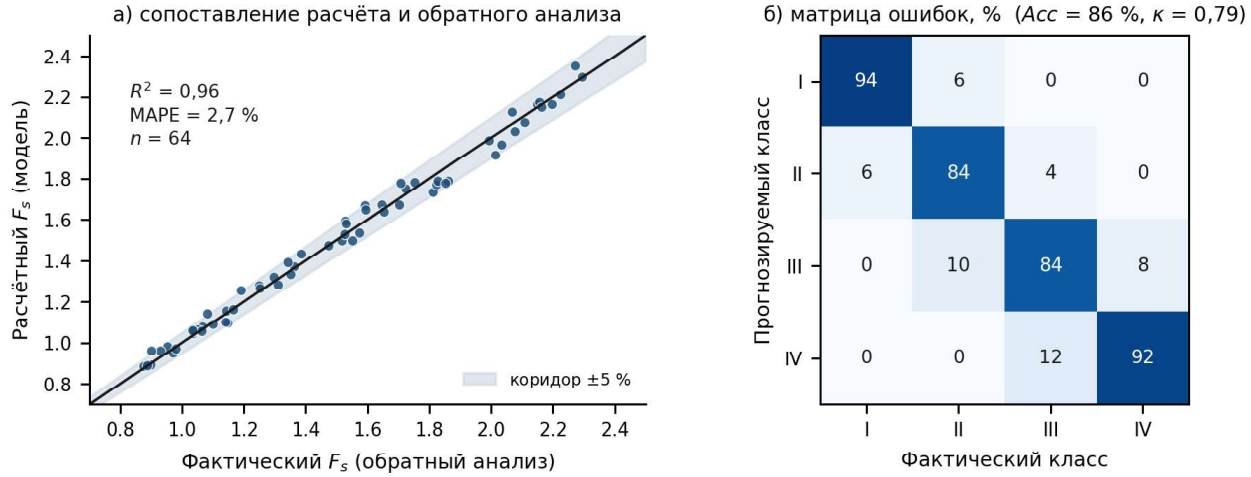


Рисунок 4. Верификация модели: сопоставление расчётных и фактических значений коэффициента устойчивости (а) и матрица ошибок классификации блоков по классам риска (б)

Полученные значения (коэффициент детерминации 0,96 при средней относительной ошибке 2,7 % по выборке из 64 участков) свидетельствуют о высокой адекватности модели. Практически все точки располагаются в коридоре ±5 % относительно линии идеального соответствия.

Корректность классификации оценена построением матрицы ошибок, в которой сопоставляются прогнозируемый и фактически наблюдавшийся класс риска. Общая точность классификации определяется как:

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \qquad (22)$$

где Acc — общая точность классификации; TP, TN — число верно классифицированных положительных и отрицательных случаев; FP, FN — число ошибок первого и второго рода. Для оценки согласованности с учётом случайных совпадений применяется коэффициент Коэна:

$$K_{Cohen} = \frac{p_0 - p_e}{1 - p_e} \qquad (23)$$

где p_o — наблюдаемая доля совпадений; p_e — ожидаемая доля совпадений при случайной классификации. Значения коэффициента выше 0,80 соответствуют почти полной согласованности.

По результатам верификации общая точность классификации составила 86 % при коэффициенте Коэна 0,79. Анализ матрицы ошибок показал, что подавляющее большинство ошибок приходится на смежные классы, тогда как грубых ошибок — отнесения критических блоков к низкому классу риска — не зафиксировано. Это обстоятельство принципиально: модель ошибается в сторону консерватизма, что приемлемо с позиций безопасности.

Отдельно выполнена оценка чувствительности результатов к качеству исходных данных. Установлено, что наибольшее влияние на точность оказывает плотность сети пьезометров: при сокращении числа точек замера порового давления вдвое ошибка расчёта коэффициента устойчивости возрастает с 2,7 % до 6,1 %. Это обосновывает приоритетность развития сети гидрогеологического контроля при ограниченных ресурсах.

8. Математическая формализация модели

Формализация разработанной модели позволяет представить её в виде, пригодном для программной реализации и интеграции в алгоритмы горного планирования. Геотехническая блочная модель определяется как конечное множество блоков, каждый из которых характеризуется координатами центра и вектором атрибутов:

$$\mathcal{M} = \{B_j\}_{j=1}^{M}, B_j = (x_j, a_j) \qquad (24)$$

где $\mathcal{M}$ — геотехническая блочная модель; B_j — j-й блок; M — общее число блоков; x_j — вектор координат центра блока; a_j — вектор геотехнических атрибутов, включающий все сформированные характеристики:

$$a_j = (\theta_{k,j}, I_{\mu,j}, P_{32,j}, u_j F_{s,j}, PoF_j, R_j)^T \qquad (25)$$

Формирование вектора атрибутов представляет собой применение оператора преобразования к исходным данным:

$$a_j = \Phi(d_j p), \qquad \Phi : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^m \qquad (26)$$

где Ф — оператор формирования атрибутов; d_j — вектор исходных данных, относящихся к блоку (результаты опробования, картирования, замеров); p — вектор параметров модели (коэффициенты вариации, весовые коэффициенты, граничные значения классов); n — размерность пространства исходных данных; m — размерность вектора атрибутов.

Оператор Ф имеет иерархическую структуру и представляется композицией частных операторов, соответствующих этапам формирования атрибутов:

$$\Phi = \Phi_5 \cdot \Phi_4 \cdot \Phi_3 \cdot \Phi_2 \cdot \Phi_1 \qquad (27)$$

Иерархическая структура оператора обеспечивает два практически важных свойства модели. Модульность: каждый частный оператор может быть усовершенствован независимо от остальных — например, замена метода интерполяции литологии не требует изменения процедур расчёта устойчивости. Прослеживаемость: для любого значения производного атрибута может быть восстановлена вся цепочка вычислений вплоть до исходных замеров, что необходимо при обосновании принимаемых решений и при разборе нештатных ситуаций.

Вычислительная сложность формирования модели определяется преимущественно оператором расчёта устойчивости и вероятности обрушения. При принятых параметрах полный пересчёт модели занимает 4,5 часа на стандартной рабочей станции, что допускает еженедельное обновление; пересчёт только динамических атрибутов (поровое давление, коэффициент устойчивости) — 25 минут, что обеспечивает возможность ежесуточной актуализации.

Разработанная математическая модель служит основой для интеграции геотехнической информации в алгоритмы оптимизации горных работ: вектор атрибутов aj непосредственно используется при формировании ограничений оптимизационной задачи, а классификация по риску определяет допустимость включения блока в план горных работ.

Заключение

1. Разработана концепция геотехнической блочной модели глубокого карьера, основанная на принципах единства пространственной основы, иерархии выводимых атрибутов и разделения атрибутов по характеру изменчивости во времени. Обоснована структура модели, включающая 14 атрибутивных слоёв, и параметры элементарного блока 10 × 10 × 15 м, удовлетворяющие условию представительного элементарного объёма.

2. Разработана методика формирования атрибута литологического состава на основе индикаторного кригинга с сохранением долей литотипов для смешанных блоков, доля которых составила 14 % общего числа.

3. Предложен индекс микротрещиноватости, объединяющий показатель RQD и характеристики состояния трещин, позволяющий ранжировать блоки по степени структурного ослабления в пределах одного литотипа при изменении прочности массива в 3—4 раза.

4. Обосновано описание макротрещиноватости моделью сети дискретных трещин с использованием объёмной интенсивности P32 и распределения Фишера для ориентировок; установлено выполнение условия применимости модели сплошной среды для всех геотехнических доменов.

5. Разработана процедура присвоения блокам порового давления на основе решения фильтрационной задачи с дифференцированными по доменам коэффициентами фильтрации и ежесуточной актуализацией по данным пьезометрической сети.

6. Разработана методика оценки вероятности обрушения блока методом Монте-Карло; установлено, что для получения устойчивой оценки с погрешностью не более 0,3 процентных пункта достаточно 10 000 реализаций на блок.

7. Предложена классификация блоков по четырём уровням геотехнического риска с установленным регламентом ведения работ для каждого класса; получено распределение 54 / 27 / 13 / 6 % по классам I—IV.

8. Верификация модели подтвердила её адекватность: коэффициент детерминации 0,96 при средней относительной ошибке 2,7 %, точность классификации 86 % при коэффициенте Коэна 0,79; установлено, что ошибки модели носят консервативный характер.

9. Разработана математическая модель, формализующая геотехническую блочную модель как множество блоков с вектором атрибутов, формируемым иерархическим оператором преобразования, что обеспечивает модульность и прослеживаемость результатов и делает модель пригодной для интеграции в алгоритмы оптимизации горных работ.

Дальнейшие исследования связаны с включением в модель данных непрерывного радарного мониторинга смещений для байесовского уточнения параметров распределений прочностных характеристик, а также с интеграцией геотехнической блочной модели в оптимизационные процедуры средне- и краткосрочного планирования горных работ.

GEOTECHNICAL BLOCK MODEL OF A DEEP OPEN-PIT MINE: STRUCTURE, METHODOLOGY FOR ATTRIBUTE DEVELOPMENT, AND GEOTECHNICAL RISK ASSESSMENT

[1]Karimov Sh. V., [1]Qarshiboyev Z. J., [2]Qarshiboyeva M. U.
[1]Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS, Almalyk, Uzbekistan.
[2]Almalyk Mining and Metallurgical Complex, Almalyk, Uzbekistan.

ABSTRACT A geotechnical block model of a deep open pit is proposed — an extension of the classical geological-economic block model, in which each elementary block is endowed with a full set of geomechanical characteristics. The model concept is built on three principles: unity of the spatial framework, hierarchy of derived attributes, and separation of attributes according to the nature of their variability over time. Methods have been developed for forming primary attributes — lithological composition based on indicator kriging with preservation of lithotype proportions for mixed blocks, a microfracturing index combining the RQD indicator with joint condition characteristics, and the volumetric intensity of macrofracturing based on a DFN model. Pore pressure is assigned to blocks based on the solution of a seepage (filtration) problem with filtration coefficients differentiated by domain. The safety factor is calculated using the Mohr–Coulomb criterion with strength characteristics obtained from the Hoek–Brown criterion, and the probability of failure is calculated using the Monte Carlo method. A classification of blocks into four levels of geotechnical risk is proposed, with a set of operating regulations for each class. The model is formalized as a set of blocks with an attribute vector generated by a hierarchical transformation operator. Verification across 64 sites confirmed the adequacy of the model: a coefficient of determination of 0.96 with a mean relative error of 2.7%, a classification accuracy of 86% with a Cohen's kappa coefficient of 0.79; the model's errors were shown to be conservative in nature.

KEYWORDS geotechnical block model, deep open pit, slope stability, safety factor, probability of failure, geotechnical risk, indicator kriging, RQD, Geological Strength Index (GSI), Hoek–Brown criterion, DFN model, volumetric fracture intensity, pore pressure, Monte Carlo method, reliability index, risk classification, model verification.

CHUQUR KARYERNING GEOTEXNIK BLOK MODELI: TUZILISHI, ATRIBUTLARNI SHAKLLANTIRISH METODIKASI VA GEOTEXNIK XATARNI BAHOLASH

[1]Karimov Sh. V., [1]Qarshiboyev Z. J., [2]Qarshiboyeva M. U.
[1]«MISIS» Milliy tadqiqot texnologik universitetining Olmaliq filiali, Olmaliq, O‘zbekiston.
[2]Olmaliq kon-metallurgiya kombinati, Olmaliq, O‘zbekiston.

ANNOTATSIYA Chuqur karyerning geotexnik blokli modeli taklif etilgan — bu klassik geologik-iqtisodiy blokli modelning kengaytirilgan ko‘rinishi bo‘lib, unda har bir elementar blokka geomexanik xususiyatlarning to‘liq to‘plami beriladi. Model konsepsiyasi uchta tamoyilga asoslangan: fazoviy asosning yagonaligi, chiqarilgan atributlarning ierarxiyasi va atributlarning vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchanlik xususiyatiga ko‘ra ajratilishi. Birlamchi atributlarni shakllantirish uslubiyotlari ishlab chiqilgan — aralash bloklar uchun litotiplar ulushini saqlab qolgan holda indikator kriging asosida litologik tarkib, RQD ko‘rsatkichi va yoriqlar holati xususiyatlarini birlashtiruvchi mikrodarzlik indeksi, hamda DFN-modeli bo‘yicha makrodarzlikning hajmiy intensivligi. G‘ovak bosimi domenlar bo‘yicha farqlangan filtratsiya koeffitsiyentlari bilan filtratsiya masalasining yechimiga asoslanib bloklarga biriktiriladi. Turg‘unlik koeffitsiyenti Xuk—Braun mezoni bo‘yicha olingan mustahkamlik xususiyatlari bilan Mor—Kulon mezoni bo‘yicha hisoblanadi, qulash ehtimoli esa Monte-Karlo usuli bilan hisoblanadi. Bloklarni geotexnik xavf-xatarning to‘rtta darajasi bo‘yicha tasniflash va har bir sinf uchun ishlarni yuritish reglamenti taklif etilgan. Model ierarxik almashtirish operatori orqali shakllantiriladigan atributlar vektoriga ega bloklar to‘plami sifatida formallashtirilgan. 64 ta uchastka bo‘yicha verifikatsiya modelning adekvatligini tasdiqladi: determinatsiya koeffitsiyenti 0,96, o‘rtacha nisbiy xato 2,7%, tasniflash aniqligi 86%, Koen koeffitsiyenti 0,79; modelning xatolari konservativ xarakterga ega ekanligi ko‘rsatildi.

KALIT SO‘ZLAR geotexnik blokli model, chuqur karyer, bortlar turg‘unligi, turg‘unlik koeffitsiyenti, qulash ehtimoli, geotexnik xavf-xatar, indikator kriging, RQD, geologik mustahkamlik indeksi GSI, Xuk—Braun mezoni, DFN-model, darzlikning hajmiy intensivligi, g‘ovak bosimi, Monte-Karlo usuli, ishonchlilik indeksi, xavf-xatarni tasniflash, modelni verifikatsiya qilish.

REFERENCES

1. Read J., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design. — Leiden: CRC Press / CSIRO Publishing, 2009. — 496 p.
2. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek–Brown failure criterion — 2002 edition // Proceedings NARMS-TAC. — Toronto, 2002. — P. 267–273.
3. Hoek E., Diederichs M. S. Empirical estimation of rock mass modulus // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2006. — Vol. 43, № 2. — P. 203–215.
4. Deere D. U., Deere D. W. The rock quality designation (RQD) index in practice // Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984. — Philadelphia, 1988. — P. 91–101.
5. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support // Rock Mechanics. — 1974. — Vol. 6, № 4. — P. 189–236.
6. Bieniawski Z. T. Engineering Rock Mass Classifications. — New York: Wiley, 1989. — 251 p.
7. Marinos P., Hoek E. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation // Proc. GeoEng2000. — Melbourne, 2000. — P. 1422–1446.
8. Dershowitz W. S., Herda H. H. Interpretation of fracture spacing and intensity // Proc. 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics. — Santa Fe, 1992. — P. 757–766.
9. Fisher R. A. Dispersion on a sphere // Proceedings of the Royal Society A. — 1953. — Vol. 217. — P. 295–305.
10. Goovaerts P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. — New York: Oxford University Press, 1997. — 483 p.
11. Journel A. G. Nonparametric estimation of spatial distributions // Journal of the International Association for Mathematical Geology. — 1983. — Vol. 15, № 3. — P. 445–468.
12. Dawson E. M., Roth W. H., Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction // Géotechnique. — 1999. — Vol. 49, № 6. — P. 835–840.
13. Duncan J. M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 2000. — Vol. 126, № 4. — P. 307–316.
14. Rose N. D., Hungr O. Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2007. — Vol. 44. — P. 308–320.
15. Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales // Educational and Psychological Measurement. — 1960. — Vol. 20, № 1. — P. 37–46.
16. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. — М.: Недра, 1965. — 378 с.
17. Ржевский В. В. Открытые горные работы. Ч. 1, 2. — М.: Недра, 1985. — 509 с.
18. Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р. Основы горного дела. — М.: Академия горных наук, 2010. — 448 с.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Karimov Sherzod Vafo ugli — PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mining; Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), 110105, Almalyk, Amir Temur Str., 56, Tashkent Region, Uzbekistan. E-mail: karimov20-13@mail.ru
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8618-3703

Qarshiboyev Zuxriddin Jumanazar ugli — PhD Student; Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), 110105, Almalyk, Amir Temur Str., 56, Tashkent Region, Uzbekistan. E-mail: qarshiboyevzuhriddin@gmail.com

Qarshiboyeva Muxlisa Umirzak qizi — Flotation Operator; Almalyk Mining and Metallurgical Complex JSC, 110100, Almalyk, Amir Temur Str., 53, Tashkent Region, Uzbekistan.
E-mail: muxlisaqarshiboyeva082@gmail.com