BORT VA POG‘ONALAR TURG‘UNLIGINI TEKTONIK KUCHLANISHNI HISOBGA OLGAN HOLDA KOMPLEKS BAHOLASH VA MONITORING METODIKASI (QALMOQQIR KONI MISOLIDA)

Madaliyev O. X.
Olmaliq davlat texnika instituti
madaliyev.o@odti.uz

Annotatsiya. *Ochiq usulda kon qazish ishlarida bort va pog‘onalar turg‘unligi ishlab chiqarish xavfsizligi va uzluksizligini ta’minlovchi hal qiluvchi omillardan biri hisoblanadi. Mavjud hisoblash usullarining aksariyati faqat gravitatsion yuklama va jinsning mustahkamlik ko‘rsatkichlarini (kogeziya, ichki ishqalanish burchagi) hisobga oladi, biroq mintaqaviy tektonik kuchlanish maydonining ta’sirini e’tiborsiz qoldiradi, bu esa xavfsizlik koeffitsientini haqiqatdan yuqoriroq baholash xavfini keltirib chiqaradi. Ushbu maqolada Qalmoqqir ochiq koni misolida bort turg‘unligini besh bosqichli kompleks metodika orqali baholash taklif etiladi: yoriqlanish tizimini instrumental diagnostika qilish; tektonik kuchlanishni hisobga oluvchi analitik va sonli modellashtirish; marksheyder-geodezik monitoring orqali natijalarni dala sharoitida tekshirish; portlash parametrlarini optimallashtirish; geomexanik risklarni tizimli boshqarish. Taklif etilgan yondashuv xalqaro amaliyotda (Xitoy, Rossiya, Qozog‘iston) alohida-alohida sinovdan o‘tgan usullarni birlashtirib, mahalliy kon-geologik sharoitga moslashtirilgan yagona ilmiy-amaliy tizim sifatida shakllantiriladi. Metodikaning amaliy ahamiyati shundaki, u qimmat import monitoring uskunalarisiz, mavjud marksheyder vositalari (taxeometr, nivelir) asosida ham qo‘llanilishi mumkin.*

Kalit so‘zlar: *bort turg‘unligi, ochiq kon, xavfsizlik koeffitsienti, tektonik kuchlanish, mikroseysmik monitoring, yoriqlanish tizimi, geomexanik risk, Qalmoqqir.*

Аннотация. *Устойчивость бортов и уступов при открытой разработке месторождений является одним из решающих факторов обеспечения безопасности и непрерывности горных работ. Большинство существующих методов расчёта учитывают только гравитационную нагрузку и прочностные характеристики породы (сцепление, угол внутреннего трения), не принимая во внимание влияние регионального тектонического поля напряжений, что может привести к завышенной оценке коэффициента запаса устойчивости. В статье*

на примере карьера Калмакыр предложена комплексная пятиэтапная методология оценки устойчивости бортов: инструментальная диагностика системы трещиноватости; аналитическое и численное моделирование с учётом тектонического напряжения; верификация результатов маркшейдерско-геодезическим мониторингом; оптимизация параметров буровзрывных работ; систематизация геомеханических рисков. Предложенный подход объединяет методы, апробированные в международной практике (Китай, Россия, Казахстан), в единую научно-практическую систему, адаптированную к местным горно-геологическим условиям.

Ключевые слова: *устойчивость бортов, карьер, коэффициент запаса устойчивости, тектоническое напряжение, микросейсмический мониторинг, система трещиноватости, геомеханический риск, Кальмакыр.*

Abstract. *Slope and bench stability is one of the decisive factors ensuring safety and continuity of open-pit mining operations. Most existing calculation methods account only for gravitational loading and rock strength parameters (cohesion, internal friction angle), while neglecting the influence of the regional tectonic stress field, which may lead to an overestimated safety factor. This paper proposes a comprehensive five-stage methodology for slope stability assessment at the Qalmoqqir open-pit mine: instrumental diagnostics of the fracture system; analytical and numerical modeling accounting for tectonic stress; field verification through surveying-based monitoring; optimization of blasting parameters, and systematic geomechanical risk management. The proposed approach integrates methods separately validated in international practice (China, Russia, Kazakhstan) into a unified scientific-practical system adapted to local mining-geological conditions.*

Keywords: *slope stability, open-pit mine, factor of safety, tectonic stress, microseismic monitoring, fracture system, geomechanical risk, Qalmoqqir.*

Kirish

Karer yonbag‘irlari hamda pog‘ona tizimlarining ustuvorligi ochiq usulda foydali qazilmalarni qazib olishda xavf-xatarlarni kamaytirish hamda samarali, uzluksiz mehnat faoliyatini ta‘minlashning bosh mezoni hisoblanadi. Konlar chuqurlashib borishi bilan bort massividagi kuchlanish holati murakkablashadi, deformatsiya jarayonlari (siljish, yorilish, ko‘chki) ehtimoli ortadi. An‘anaviy statik geomexanik hisoblash usullari, odatda, faqat gravitatsion yuklama va jinsning kuch ko‘rsatkichlariga (kogeziya c, ichki ishqalanish burchagi φ) tayanadi, biroq mintaqaviy tektonik kuchlanish maydonining ta’siri ko‘pincha e’tiborsiz qoldiriladi.

Mintaqaviy tektonik kuchlanish — yer qobig‘ida tabiiy ravishda, hatto konchilik ishlaridan mustaqil holda mavjud bo‘ladigan ichki bosim maydoni bo‘lib, u tektonik plitalarning o‘zaro harakati, o‘tmishdagi tog‘ hosil bo‘lish jarayonlaridan qolgan qoldiq kuchlanishlar va yer qobig‘ining gravitatsion-izostatik muvozanati natijasida yuzaga keladi. Portlash yoki qazish natijasida hosil bo‘ladigan texnogen kuchlanishdan farqli o‘laroq, tektonik kuchlanish qazish ishlaridan oldin ham mavjud bo‘lgan tabiiy holat hisoblanadi — kon ishlari faqat uni qayta taqsimlaydi va ochib beradi. Markaziy Osiyo hududi, jumladan O‘zbekiston, Tyan-Shan tog‘ tizimi ta’sir doirasida joylashgan faol tektonik-seysmik mintaqa hisoblanadi, shu sababli bu omilni bort turg‘unligi hisob-kitoblarida e’tiborsiz qoldirib bo‘lmaydi. So‘nggi tadqiqotlar [1] shuni ko‘rsatadiki, tektonik kuchning e’tiborga olinmasligi xavfsizlik koeffitsientini sun’iy ravishda yuqori ko‘rsatishi, ya‘ni real xavfni yashirishi mumkin.

Muammoning yana bir jihati — mavjud usullarning aksariyati bort holatini bitta metodda (faqat analitik hisoblash yoki faqat vizual kuzatuv) baholaydi, holbuki zamonaviy xalqaro tajriba [1-9] kompleks, ko‘p bosqichli yondashuvning ancha ishonchli natija berishini ko‘rsatmoqda. Shu sababli, ushbu tadqiqotning maqsadi — Qalmoqqir koni misolida bort va pog‘onalar turg‘unligini baholashning tektonik kuchlanishni hisobga oluvchi, dala monitoringi orqali tasdiqlanadigan, kompleks metodikasini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi shundaki, alohida-alohida mamlakatlarda (Xitoy, Rossiya, Qozog‘iston) sinovdan o‘tgan bort turg‘unligini baholash usullari birinchi marta yagona uzviy metodikaga birlashtiriladi va O‘zbekistonning aniq kon-geologik obyekti — Qalmoqqir koni sharoitiga moslashtiriladi.

1. Mavzu bo‘yicha adabiyotlar tahlili

Bort turg‘unligini baholash bo‘yicha mavjud ilmiy yondashuvlarni besh yo‘nalishga guruhlash mumkin.

1.1. Analitik va sonli modellashtirish usullari

Yakovlev va boshq. [1] tektonik kuchlanish maydonini hisobga oluvchi analitik model taklif qilishgan; Kachkanar KMKning 30 metrlik, 60° qiyalikdagi pog‘onasi uchun tektonik kuch Ft=6,0 MN bo‘lganda yoriq burchagi 42°dan oshganda, Ft=8,0 MN bo‘lganda esa 33°dan oshganda turg‘unlik buzilishi ko‘rsatilgan. Mualliflar, shuningdek, geomexanik risklarni baholash uchun ehtimollik (voqeaning yuz berish tez-tezligini tavsiflovchi, 5 daraja: A dan E gacha) va oqibat og‘irligi (voqea yuz berganda uning natijasi qanchalik jiddiy bo‘lishini tavsiflovchi, 5 daraja) matritsasiga asoslangan tizimlashtirilgan risk reestrini taklif qilishgan.

Lazarev va Kiselev [9] Xuk-Braun nochiziqli buzilish mezoniga asoslangan mualliflik sonli algoritmini ishlab chiqishgan. Bu algoritm bort massivini chekli elementlarga bo‘lib, har bir elementning kuchlanish-deformatsiya holatini hisoblaydi, natijada bort bo‘ylab xavfsizlik koeffitsientining fazoviy taqsimotini aniqlash imkonini beradi. Usulning afzalligi shundaki, u jinsning portlash zonalaridagi nurash (vivetrivaniya) va yoriqlanish natijasida yuzaga keladigan anizotropiyasini (turli yo‘nalishda turlicha mustahkamlik ko‘rsatishini) hisobga oladi — bu klassik izotrop modellarda e’tiborga olinmaydi.

Wang, Li va Yang [3] logarifmik spiralning eng kam kvadratlar prinsipiga asoslangan vizualizatsiya usulini taklif qilishgan: bunda potensial sirpanish sirti logarifmik spiral shaklida modellashtiriladi, so‘ng energiya balansi (ishlarning tenglashish) sharti orqali eng xavfli (minimal xavfsizlik koeffitsientiga ega) sirpanish sirti tsiklik ravishda qidiriladi. Bu — yuqori chegara analiz (upper bound limit analysis) usulining bir ko‘rinishi bo‘lib, natijalar an‘anaviy chegaraviy muvozanat usuli bilan yuqori aniqlikda (R^2>0,9995) mos kelishi ko‘rsatilgan.

1.2. Yoriqlanish tizimini instrumental o‘rganish

B. Xusan, S.A. Mustafin va hammualliflar [6] Koktasjal konida bort massividagi yoriqlanish tizimini o‘rganish uchun kompleks metodika qo‘llashgan: skvajinalar video-endoskop yordamida optik suratga olingan (yoriqlar kengligi va suv bilan to‘yinganligi aniqlangan), bort sirtidagi tabiiy yoriqlar geologik kompas bilan o‘lchangan, so‘ng yig‘ilgan ma’lumotlar Dips dasturida statistik guruhlangan va SWedge dasturida potensial qulash prizmalarini baholash uchun qayta ishlangan. Natijada bort massivi yoriqlanish darajasiga ko‘ra rayonlashtirilgan.

1.3. Monitoring texnologiyalari

Timofeeva va hammualliflar [4] MSR (Movement & Surveying Radar) radiolokatsion tizimini tavsiflashgan. MSR — yer usti (nazoratchi) radari bo‘lib, u quyidagi asosiy qismlardan tashkil topadi: signal chiqaruvchi/qabul qiluvchi antenna bloki, signalni qayta ishlovchi hisoblash bloki, quvvat manbai va ma’lumotni uzatish moduli. Radar bort qarshisidagi barqaror, xavfsiz masofadagi (30 dan 2500 metrgacha) nuqtaga o‘rnatiladi va bort tomon yuqori chastotali elektromagnit (mikroto‘lqin) signal yuboradi. Har bir qayta skanerlashda signalning bort sirtidan qaytib kelish fazasi (interferometrik tamoyil) oldingi o‘lchov bilan solishtiriladi — hatto millimetrning bir necha ulushi darajasidagi siljish ham signal fazasining o‘zgarishi orqali aniqlanadi. Bu tizim gorizontal tekislikda -104° dan +104° gacha bo‘lgan sektorni muntazam skanerlab, bort sirtining butun deformatsiya xaritasini real vaqt rejimida, istalgan ob-

havo sharoitida (tuman, yomg‘ir, chang, tungi vaqt) yangilab boradi — bu uni optik/lazer asosidagi usullardan ustun qiladi.

Zhao va hammualliflar [2] Xitoyning Changshanhao (CSH) konida mikroseysmik (MS) monitoring tizimini qo‘llashgan. Mikroseysmik monitoring — bu passiv «tinglash» tizimi: jins massivi ichida mikroyorilish (mikro-treshchina) yuz berganda, ozgina elastik to‘lqin energiyasi ajralib chiqadi (xuddi mikroskopik zilzila kabi). Bort atrofidagi maxsus burg‘ilangan skvajinalarga o‘rnatilgan 12 ta sensor (akselerometr) ushbu to‘lqinni qayd etadi; turli sensorlarga signal turli vaqtda yetib kelgani uchun (signalning kelish vaqtidagi farq orqali, xuddi zilzila o‘chog‘ini aniqlashga o‘xshab) yorilish joyi fazoviy jihatdan uch o‘lchamda aniqlanadi. Bunga qo‘shimcha ravishda inklinometrlar qo‘llanilgan — bu asbob burg‘ilash skvajinasi ichiga o‘rnatilgan moslashuvchan quvur bo‘lib, uning turli chuqurlikdagi qiyalik burchagini davriy o‘lchash orqali yer qa‘ridagi qaysi chuqurlikda gorizontal siljish sodir bo‘layotganini (ya‘ni sirpanish sirtining chuqurligini) aniqlash imkonini beradi.

Bort holatini baholash uchun ikkita muhim ko‘rsatkich hisoblab chiqilgan. Birinchisi — ES/EP nisbati, ya‘ni har bir mikroseysmik voqeaning S-to‘lqin (kesish to‘lqini) energiyasining P-to‘lqin (siqilish to‘lqini) energiyasiga nisbati; bu nisbat qayd etilgan tebranish signalining o‘zidan, signalni qayta ishlash dasturi orqali S- va P-to‘lqin qismlarining energiyasini alohida hisoblash yo‘li bilan olinadi, va u yorilishning turini (cho‘zilish yoki siljima xarakterda ekanini) ko‘rsatadi. Ikkinchisi — Gutenberg-Richter munosabatidagi b-qiymat: bu qiymat ma‘lum vaqt oralig‘ida qayd etilgan barcha mikroseysmik voqealarning magnitudaviy taqsimotini statistik chiziqli regressiya orqali tahlil qilish natijasida olinadi ($\log_{10} N = a - bM$ tenglamasi asosida); b-qiymatning pasayishi kattaroq miqyosdagi buzilish xavfi ortayotganidan dalolat beradi. Ushbu tizim orqali CSH konida bortni yengillashtirishdan so‘ng xavfsizlik koeffitsienti 1,15 dan 1,30 gacha oshgan, mikroseysmik voqealar soni esa 86% ga kamaygan.

Kagan va Chernobrov [8] Rossiyaning Kovdor GOKidagi «Jelezniy» rudnigida chekka konturdan tashqaridagi, ~1000 metr chuqurlikdagi skvajinalarga o‘rnatilgan 12 sensorli tizim orqali uch yillik monitoring o‘tkazib, 2495 ta seysmik voqeani (shundan 45 tasi 10^5 Jouldan yuqori energiyali) qayd etishgan va seysmik faol zonalarning yillar davomida fazoviy migratsiyasini aniqlashgan.

1.4. Portlash parametrlarini optimallashtirish

Sh.Sh. Zairov va hammualliflar [5] Olmaliq KMK (AGMK)ning «Yoshlik-I» (Qalmoqqir) konida botiq profilli qiyalik shakllantirish texnologiyasini sanoat sharoitida sinab ko‘rishgan: 30 metrlik pog‘onani uchta kichik bosqichga (podustup)

bo‘lib, qiya kontur skvajinalar (79°, 77°, 64° burchak ostida) va emulsion portlovchi moddalar (almonit, nobelit) yordamida bosqichma-bosqich portlatish orqali 70° qiyalik burchagiga ega turg‘un otkos olishgan. Bu — nazariy taklif emas, balki sanoat sharoitida sinovdan o‘tkazilgan real natija: standart usulda talab qilinadigan qo‘shimcha bort kengaytirish (razmetka (bortni kengaytirish)) ishlariga ehtiyoj qolmagan.

Wang va hammualliflar [7] adaptiv optimal yadro (Adaptive Optimum Kernel, AOK) vaqt-chastota tahlili texnikasidan foydalanishgan. Bu usul portlash tebranish signalini bir vaqtning o‘zida ham vaqt, ham chastota o‘qi bo‘yicha tahlil qilish imkonini beradi (klassik Fure tahlilidan farqli o‘laroq, signalning vaqt davomida qanday o‘zgarishini yo‘qotmaydi). Tahlil natijasida bort jinsiga zarar yetkazuvchi tebranish energiyasi asosan 0-78,125 Hz chastota diapazonida to‘planishi aniqlangan. Bundan tashqari, mualliflar zarrachalarning maksimal tezligiga (Peak Particle Velocity, PPV) asoslangan tezkor xavfsizlik mezonini taklif qilishgan: portlash natijasida yuzaga keladigan dinamik kuchlanish ($\sigma = \rho \cdot c \cdot v$, bu yerda ρ — jinsning zichligi, c — tebranish to‘lqinining tarqalish tezligi, v — zarracha tezligi) statik kuchlanish bilan qo‘shilib, jinsning yakuniy cho‘zilish mustahkamligidan oshmasligi kerak.

1.5. Adabiyotlar tahlilining umumlashtirilgan xulosasi

O‘tkazilgan tahlil shuni ko‘rsatadiki, mavjud usullarning har biri o‘z sohasida samarali, biroq ularning birortasi ham to‘liq kompleks yechimni taklif etmaydi: analitik-sonli usullar [1, 3, 9] dala tekshiruvisiz qoladi, monitoring texnologiyalari [2, 4, 8] tektonik omilni hisobga olmaydi, portlash optimallashtirish usullari [5, 7] esa alohida muhandislik-texnologik masala sifatida ko‘riladi. Bu — barcha yo‘nalishlarni birlashtirgan kompleks metodika ishlab chiqish zaruratini asoslaydi.

2. Tadqiqot obyekti va metodikasi

2.1. Tadqiqot obyekti

Tadqiqot obyekti sifatida O‘zbekiston Respublikasidagi Olmaliq kon-metallurgiya kombinati (OKMK) tarkibidagi Qalmoqqir mis-molibden ochiq koni tanlandi. Kon Toshkent viloyatidagi Olmaliq shahrining shimoli-g‘arbiy qismida joylashgan bo‘lib, misporfir tipidagi dunyo bo‘yicha eng yirik 10 ta obyektdan biri hisoblanadi. Karyerning yer yuzasi bo‘yicha uzunligi ~4200 m, kengligi 1800-2300 m, eng yuqori belgidan karyer tubigacha bo‘lgan chuqurligi 470 metrdan ortiq, dengiz sathidan 750-1350 m balandlikda joylashgan [11, 12].

Konning geologik strukturasi cho‘kindi, magmatik va metamorfik jinslardan tashkil topgan. Asosiy tog‘ jinslari — siyenit-diorit, granodiorit-porfir va andezit-datsit porfir bo‘lib, bularga qo‘shimcha ravishda riolitporfirlar, dolomitlar, ohaktoshlar,

kvarsli monsonitporfirlar va ikkilamchi kvarsitlar uchraydi. Ruda va tog‘ jinslari massivi bir-biriga yaqin (zich) darzlar to‘ri bilan katta va kichik bloklarga bo‘lingan, yoriqlar erigan minerallar bilan to‘lgan [11]. Konda ikki turdagi yer osti suvi mavjud: to‘rtlamchi davr konlarining yer osti suvlari va paleozoy yoriqlaridagi yer osti suvlari.

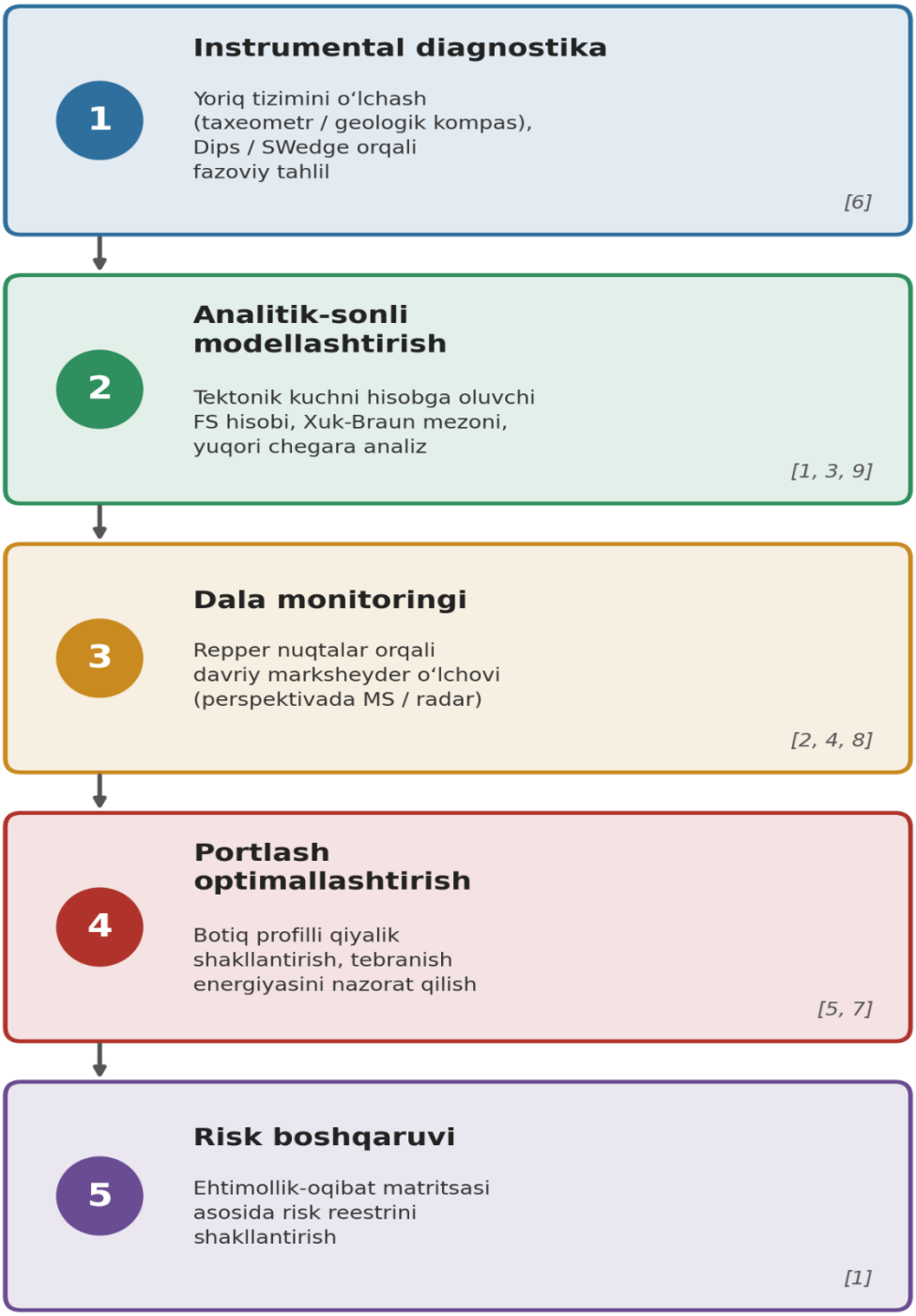
Kon jinslarining qattiqlik koeffitsiyenti (Protodyakonov shkalasi bo‘yicha) 6 dan 14 gacha o‘zgaradi; sulfid rudalarining zichligi 2,6-2,8 t/m³, kon (qoplama) jinslarining zichligi esa 2,4-2,6 t/m³ ni tashkil etadi [11]. Ochish va foydali qazilmani qazib olish ishlari hozirgi vaqtda 25 ta pog‘onada olib boriladi, ulardan 16 tasining loyihaviy balandligi 15 m, 9 tasiniki esa 22,5 m ni tashkil etadi; ishchi pog‘onalarning otkos qiyalik burchagi 70-80° oralig‘ida. Karyerning yakuniy (statik) umumiy bort qiyalik burchagi, jinslarning fizik-mexanik xususiyatlaridan kelib chiqib, o‘rtacha 37-42° (ayrim barqaror zonalarda 35-45°) atrofida qabul qilingan [11].

Yaqin joylashgan «Yoshlik-I» konidan (bir xil kon-geologik majmua tarkibiga kiradi) olingan siyenit-diorit va diorit jinslarining laboratoriya sinov natijalari 2.1-jadvalda keltirilgan; bu ma’lumotlar Qalmoqqirning tektonik-litologik jihatdan yaqinligi sababli dastlabki taqqoslash uchun qo‘llanildi.

2.1-jadval

Ko‘rsatkich	**Siendiorit (kuchsiz o‘zg.)**	**Siendiorit (o‘rta o‘zg.)**	**Siendiorit (kuchli o‘zg.)**	**Diorit (kuchsiz o‘zg.)**	**Diorit (o‘rta o‘zg.)**	**Diorit (kuchli o‘zg.)**
Hajmiy massa, g/sm³	2,57-2,94	2,54-2,81	2,52-2,91	2,64-3,06	2,61-2,95	2,64-3,01
Siqilishga qarshilik (tabiiy), kgs/sm²	202-2173	118-1147	231-842	180-1761	425-1000	740-780
Cho‘zilishga qarshilik, kgs/sm²	40-250	39-168	148-165	195-235	138-145	146-170
Kogeziya (sila stsepleniya), kgs/sm²	44-357	58-120	38-130	30-370	96-205	55-198
Ichki ishqalanish burchagi, °	61-80	-	50-65	45-48	-	43-46
Elastiklik moduli, $\times 10^5$ kgs/sm²	4,6-5,4	-	4,0-4,6	4,2-6,21	-	3,8-4,5

2.1-jadval. «Yoshlik-I» koni jinslarining fizik-mexanik xususiyatlari (kon geologiya bo‘limi ma’lumotlari asosida). MUHIM IZOH: bu qiymatlar but (yaxlit) jins namunalarining laboratoriya sinov natijalari bo‘lib, bort massasidagi yoriq/zaif tekislik bo‘ylab siljish mustahkamligidan sezilarli darajada yuqori bo‘ladi.



1-rasm. Bort turg‘unligini baholashning besh bosqichli kompleks metodikasi sxemasi

2.2. Umumiy metodologik yondashuv

Taklif etilayotgan metodika beshta izchil bosqichdan iborat bo‘lib, har biri xalqaro tajribada sinovdan o‘tgan alohida usulga asoslanadi. Quyidagi 2.2-jadvalda faqat umumlashtirilgan xarita vazifasini bajaradi — har bir usulning batafsil tavsifi yuqorida, 1-bo‘limda keltirilgan.

2.2-jadval

№	Bosqich	Mazmuni	Asos manba
1	Instrumental diagnostika	Yoriq tizimini o‘lchash (taxeometr/geologik kompas), Dips/SWedge orqali fazoviy tahlil	[6]
2	Analitik-sonli modellashtirish	Tektonik kuchni hisobga oluvchi FS hisobi, Xuk-Braun mezoni asosidagi sonli model, yuqori chegara analiz	[1, 3, 9]
3	Dala monitoringi	Repper nuqtalar orqali davriy marksheyder o‘lchovi (perspektivada MS/radar)	[2, 4, 8]
4	Portlash optimallashtirish	Botiq profilli qiyalik shakllantirish, tebranish energiyasini nazorat qilish	[5, 7]
5	Risk boshqaruvi	Ehtimollik-oqibat matritsasi asosida risk reestrini shakllantirish	[1]

2.3. Xavfsizlik koeffitsientini hisoblash usullari

Tadqiqotda xavfsizlik koeffitsienti (FS) uchta o‘zaro to‘ldiruvchi usul orqali hisoblanadi.

Kulon-Mor mustahkamlik sharti (asosiy tenglama):

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan\varphi \qquad (1)$$

bu yerda:

• τ — siljishga qarshilik,

• c — kogeziya (MPa),

• σ — normal kuchlanish (MPa),

• φ — ichki ishqalanish burchagi (gradus, °).

Tekis sirpanish (planar sliding) uchun klassik xavfsizlik koeffitsienti:

$$FS = [c \cdot A + (W \cdot \cos\psi - U) \cdot \tan\varphi]/(W \cdot \sin\psi) \qquad (2)$$

bu yerda:

• A — sirpanish sirti maydoni (m²),

• W — blok og‘irligi (kN),

• ψ — sirpanish sirtining tushish burchagi (°),

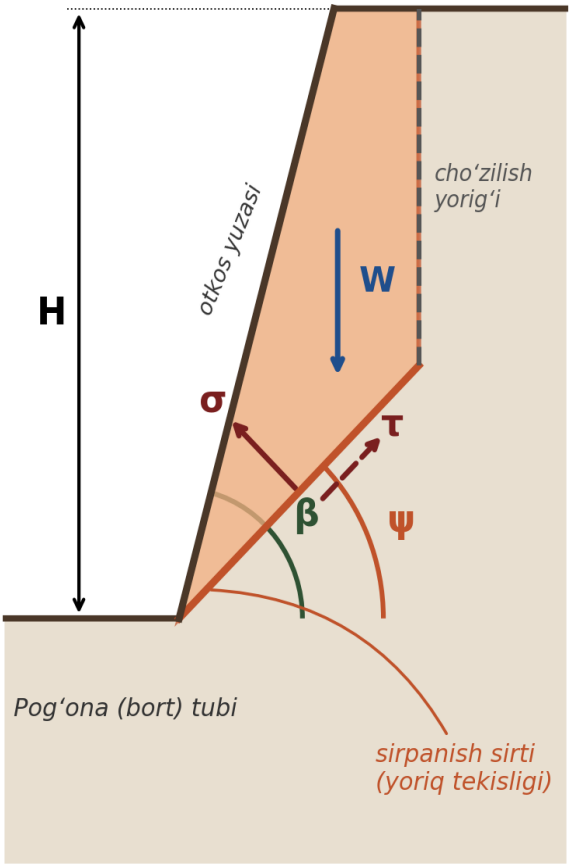
• U — poravoy suv bosimi kuchi (kN).

Tektonik kuchlanishni hisobga oluvchi tuzatilgan xavfsizlik koeffitsienti [1]:

$$FS = \frac{[c \cdot A + (W \cdot \cos\psi - U) \cdot \tan\varphi - Ft \cdot \sin\psi]}{(W \cdot \sin\psi + \mathrm{Ft} \cdot \cos\psi)} \qquad (3)$$

bu yerda: Ft — mintaqaviy tektonik kuchlanish maydonidan kelib chiquvchi qo‘shimcha kuch (MN).

Tekis sirpanish modeli sxemasi (planar sliding)
H — pog‘ona balandligi, β — otkos qiyalik burchagi, ψ — sirpanish sirti tushish burchagi,
W — blok og‘irligi, σ — normal kuchlanish, τ — siljishga qarshilik



2-rasm. Tekis sirpanish modelining sxematik tasviri (H, β, ψ, W, σ, τ parametrlari)

Uchinchi tekshiruv sifatida (2) va (3) formulalar natijalari Rocscience Slide2 dasturidagi sonli model natijasi bilan solishtiriladi; farq 5-10% chegarasida bo‘lganda metodika ishonchli deb hisoblanadi.

(2) va (3) formulalardagi A (sirpanish sirti maydoni) va W (sirpanuvchi blok og‘irligi) kattaliklari, oddiy uchburchak blok geometriyasi uchun, klassik tekis sirpanish tahlili formulalari [10] orqali quyidagicha hisoblanadi:

$$A = H / \sin\psi \quad (4)$$

$$W = 0{,}5 \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot (\cot\psi - \cot\beta) \quad (5)$$

bu yerda:

• H — pog‘ona (yoki bort) balandligi (m),

• γ — jinsning hajmiy og‘irligi (kN/m³),

• β — bort/pog‘ona otkosining umumiy qiyalik burchagi (°).

(4) va (5) formulalar natijalari birlik kenglik (1 m) uchun hisoblanadi.

2.4. Dala monitoringi metodikasi va krip nazariyasi

Zamonaviy radiolokatsion va mikroseysmik uskunalarga [2, 4, 8] hozircha kirish imkoni cheklangan bo‘lgani sababli, tadqiqotning dastlabki bosqichida klassik marksheyder-geodezik monitoring qo‘llaniladi: xavfli deb topilgan uchastkalarga repper nuqtalar o‘rnatiladi va ular taxeometr/nivelir yordamida muntazam (oylik) intervalda o‘lchanadi.

Yig‘ilgan siljish ma’lumotlari uch bosqichli krip (sudralma deformatsiya) nazariyasi [2] asosida tahlil qilinadi. Krip — bu jinsning kuchlanish o‘zgarmagan yoki sekin o‘zgaruvchi sharoitda ham vaqt o‘tishi bilan asta-sekin deformatsiyalanish xususiyati bo‘lib, u odatda uchta ketma-ket bosqichdan iborat bo‘ladi: birlamchi krip — siljish tezligi boshida yuqori bo‘lib, vaqt o‘tishi bilan asta-sekin pasayadi (jins yangi kuchlanish holatiga moslashadi); barqaror (ikkilamchi) krip — siljish deyarli bir tekis, o‘zgarmas tezlikda davom etadi, bu nisbatan uzoq davom etishi mumkin; tezlashuvchi (uchlamchi) krip — siljish tezligi keskin ortadi, bu bosqich odatda umumiy buzilish (ko‘chki)dan oldin yuzaga keladi va eng xavfli signal hisoblanadi. Amalda bu tahlil quyidagicha amalga oshiriladi: repper nuqtalaridan olingan kumulyativ siljish qiymatlari vaqt bo‘yicha grafikka tushiriladi, so‘ng siljish tezligi (grafik og‘ma burchagi) hisoblanadi. Agar tezlik pasayish tendensiyasida bo‘lsa — birlamchi bosqich, barqaror bo‘lsa — ikkilamchi bosqich, ortib borayotgan bo‘lsa — uchlamchi (xavfli) bosqich sifatida baholanadi. Adabiyotda tavsiya etilgan qo‘shimcha usul — teskari tezlik (1/tezlik) grafigini vaqt bo‘yicha chizish; bu qiymat nolga yaqinlashganda, bu buzilish vaqtining yaqinlashib kelayotganidan dalolat beradi. Olingan krip tahlili natijalari 2.3-bo‘limdagi analitik/sonli prognoz bilan taqqoslanadi.

3. Kutilayotgan natijalar

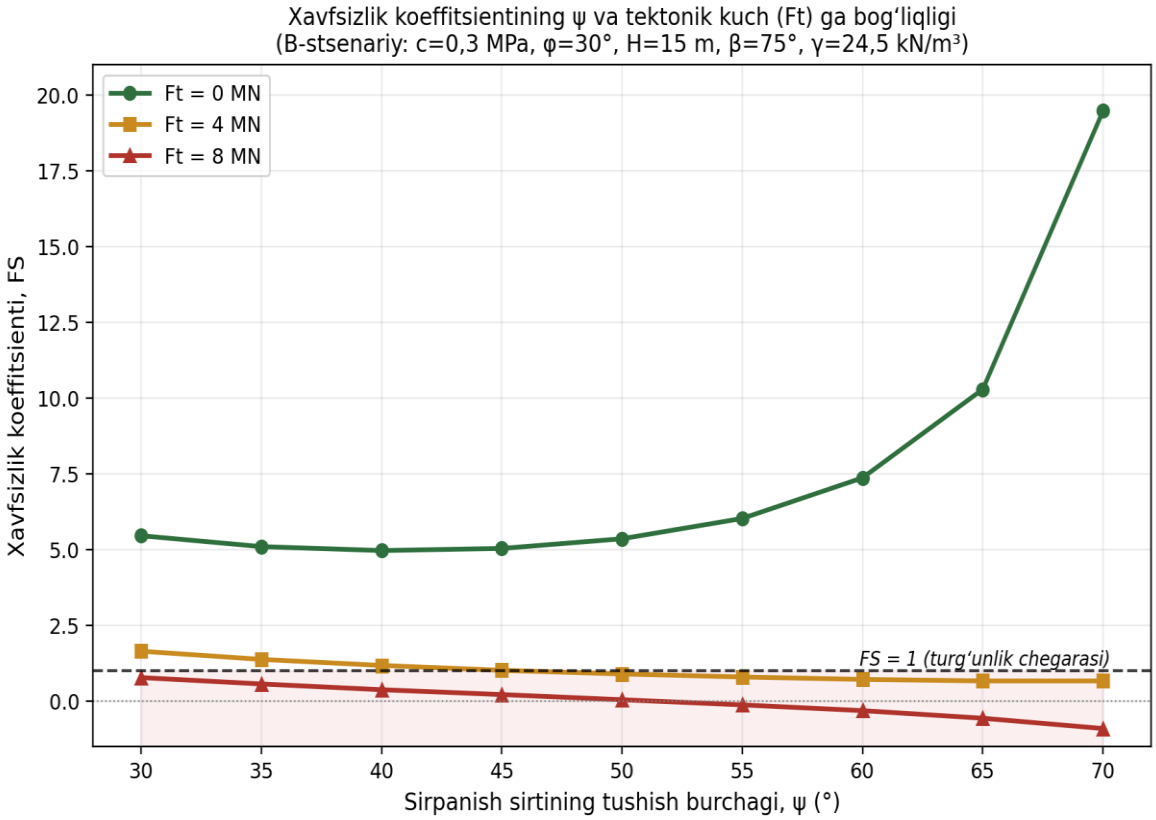
Quyida 2.1 va 2.3-bo‘limlardagi real geometrik va zichlik ma’lumotlari (H=15 m, β=75°, γ=24,5 kN/m³) asosida, formulalar (2)-(5) yordamida bajarilgan dastlabki sezgirlik (sensitivity) tahlili keltirilgan. Bu tahlil ikki maqsadga xizmat qiladi: (1) xavfsizlik koeffitsientining sirpanish sirti burchagi (ψ) va tektonik kuch (Ft) ga sezgirligini ko‘rsatish, (2) hali aniqlanmagan parametrlarning (ψ, Ft, yoriq c/φ) ustuvorligini asoslash. MUHIM IZOH: quyidagi natijalar YAKUNIY EMAS — ular ψ, U va Ft parametrlarining hozircha aniq bo‘lmaganligi sababli, ikki chegara stsenariysi asosida hisoblangan.

3.1. A-stsenariy: but jins ko‘rsatkichlari (2.1-jadvaldan)

Bu stsenariyda kogeziya va ichki ishqalanish burchagi to‘g‘ridan-to‘g‘ri 2.1-jadvaldagi laboratoriya qiymatlaridan (o‘rtacha: c≈15 MPa, φ≈65°) olindi. Hisoblash natijalari FS=200-960 oralig‘ida chiqdi (masalan, ψ=45°, Ft=0 da FS=225,2), bu fizik jihatdan mantiqsiz yuqori qiymat hisoblanadi. Bu natija nazariy jihatdan kutilgan edi va 2.1-jadval izohida keltirilgan ogohlantirishni tasdiqlaydi: but jins ko‘rsatkichlarini bort massasidagi yoriq bo‘ylab sirpanish tahliliga to‘g‘ridan-to‘g‘ri qo‘llash yaroqsiz, chunki laboratoriya namunasida yoriq, uzilma mavjud emas.

3.2. B-stsenariy: yoriq sirti uchun konservativ taxminiy qiymatlar

Ishonchli natija olish uchun, Yakovlev va boshq. [1] tomonidan Kachkanar KMK uchun qo‘llanilgan yoriq parametrlariga (c'=0,2 MPa, φ'=15°) yaqin, biroz yumshoqroq konservativ taxminiy qiymatlar qabul qilindi: c=0,3 MPa, φ=30°. Ushbu qiymatlar hali Qalmoqqir uchun instrumental yoki laboratoriya tasdig‘iga ega EMAS va faqat uslubiy namoyish maqsadida qo‘llanildi.



3-rasm. Xavfsizlik koeffitsienti (FS) ning sirpanish burchagi (ψ) va tektonik kuch (Ft) ga bog‘liqligi

Xavfsizlik koeffitsienti sirpanish burchagi ψ (30°-70°) va tektonik kuch Ft (0, 4, 8 MN) ning turli kombinatsiyalari uchun 3.2-jadvalda keltirilgan.

3.2-jadval

ψ (sirpanish burchagi, °)	**FS (Ft = 0 MN)**	**FS (Ft = 4 MN)**	**FS (Ft = 8 MN)**
30	5,46	1,65	0,78 ⚠
35	5,10	1,38	0,57 ⚠
40	4,97	1,18	0,38 ⚠
45	5,04	1,02 ⚠	0,22 ⚠
50	5,36	0,90 ⚠	0,05 ⚠
55	6,03	0,80 ⚠	−0,12 ⚠
60	7,37	0,72 ⚠	−0,31 ⚠
65	10,29	0,67 ⚠	−0,56 ⚠
70	19,47	0,67 ⚠	−0,90 ⚠

3.2-jadval. Xavfsizlik koeffitsientining (B-stsenariy, c=0,3 MPa, φ=30°) sirpanish burchagi (ψ) va tektonik kuch (Ft) ga bog‘liqligi (H=15 m, β=75°, γ=24,5 kN/m³, U=0 — quruq holat). ⚠ belgisi FS≤1 yoki 1 ga yaqin (xavfli/beqaror) natijalarni bildiradi.

3.2-jadvaldan ko‘rinadiki: (a) tektonik kuchsiz (Ft=0) holatda barcha ψ qiymatlarida FS>5, ya‘ni shartli «xavfsiz»; (b) Ft=4 MN qo‘shilganda, ψ=45-70° oralig‘ida FS≈1 atrofiga yoki undan pastga tushadi; (c) Ft=8 MN da ψ≥50° bo‘lgan barcha holatlarda FS <1 (jumladan bir necha holatda manfiy qiymat, bu matematik modelda muvozanat topilmasligini bildiradi). Bu natija tadqiqotning asosiy gipotezasini — tektonik kuchlanishni e’tiborsiz qoldirish xavfsizlik koeffitsientini sun’iy yuqori ko‘rsatishi mumkinligini — dastlabki miqdoriy darajada tasdiqlaydi, biroq YAKUNIY XULOSA faqat quyidagi uchta parametr aniqlangandan so‘ng chiqarilishi mumkin:

• ψ — bort massividagi haqiqiy xavfli yoriq to‘plamining tushish burchagi (taxeometr bilan dala o‘lchovi orqali aniqlanadi);

• c, φ — yoriq sirtining haqiqiy siljish mustahkamligi (laboratoriya to‘g‘ridan-to‘g‘ri siljish sinovi yoki qo‘shimcha ma’lumot orqali aniqlanadi, hozirgi B-stsenariy qiymatlari faqat taxminiy);

• Ft — mintaqaviy tektonik kuchning haqiqiy kattaligi (geofizik o‘lchov yoki kengroq adabiyot tahlili orqali aniqlanishi kerak, hozirgi 4/8 MN qiymatlari boshqa kondan [1] olingan taqqoslash uchun namuna).

Ushbu uchta parametr aniqlangach, 3.2-jadval real (yakuniy) qiymatlar bilan qayta hisoblanadi, sonli model (Slide2) natijasi bilan solishtiriladi va dala monitoringi (2.4-bo‘lim) natijalari bilan tekshiriladi.

4. Muhokama

Taklif etilayotgan metodikaning ilmiy yangiligi va afzalliklari quyidagilarda namoyon bo‘ladi:

• Birinchi marta besh xil, alohida-alohida mamlakatlarda sinovdan o‘tgan yondashuv (tektonik kuchni hisobga oluvchi analitik model — Rossiya; yoriqlanishni instrumental o‘rganish — Qozog‘iston; ikki turdagi monitoring texnologiyasi — Xitoy va Rossiya; portlash orqali profilni optimallashtirish — O‘zbekiston) yagona uzviy tadqiqot doirasida birlashtiriladi;

• Xavfsizlik koeffitsienti uchta mustaqil usul (analitik, sonli, tektonik tuzatish bilan) orqali o‘zaro tekshiriladi, bu natijalarning ishonchliligini oshiradi;

• Nazariy hisob-kitob dala monitoringi bilan bevosita taqqoslanadi — bu ko‘p tadqiqotlarda amalga oshirilmaydigan, ammo metodikaning amaliy qiymatini isbotlovchi muhim bosqich;

• Metodika qimmat import monitoring uskunalari mavjud bo‘lmagan sharoitda ham (mavjud marksheyder vositalari — taxeometr, nivelir asosida) qo‘llanilishi mumkin, bu uni O‘zbekiston kon korxonalari uchun iqtisodiy jihatdan maqbul qiladi;

• Metodika kelajakda boshqa mahalliy konlarga (masalan, boshqa Olmaliq KMK uchastkalari) ham o‘tkazilishi mumkin bo‘lgan takrorlanuvchi protokol sifatida shakllantirilgan.

Shu bilan birga, metodikaning bir qator cheklovlarini ham qayd etish lozim:

• Tektonik kuch (Ft) qiymatini aniq mintaqaviy geofizik o‘lchovlarsiz faqat adabiyot ma’lumotlari asosida baholash noaniqlik kiritishi mumkin; kelgusi tadqiqotlarda mahalliy geofizik xizmat bilan hamkorlikda tektonik kuchlanish maydonini bevosita o‘lchash tavsiya etiladi;

• Dastlabki bosqichda faqat repper-taxeometr monitoringi qo‘llanilishi (oylik intervalda) zamonaviy uzluksiz radar/mikroseysmik tizimlarga nisbatan vaqtinchalik farqlash imkoniyati past — bu tezlashuvchi krip bosqichining boshlanishini kechroq aniqlash xavfini tug‘diradi;

• Taklif etilgan analitik model (tekis sirpanish) faqat bitta buzilish mexanizmini tavsiflaydi; murakkabroq (aylana shaklidagi) sirpanish holatlari uchun qo‘shimcha SWedge yoki Bishop/Fellenius usullari bilan tekshiruv zarur;

• Qalmoqqir bo'yicha tarixiy deformatsiya ma'lumotlarining cheklanganligi modelni to'liq kalibrlash imkoniyatini dastlabki bosqichda chegaralashi mumkin.

5. Xulosa

Ushbu maqolada Qalmoqqir ochiq koni misolida bort va pog‘onalar turg‘unligini baholashning besh bosqichli kompleks metodikasi taklif etildi: instrumental diagnostika, tektonik kuchlanishni hisobga oluvchi analitik-sonli modellashtirish, dala monitoringi orqali tekshiruv, portlash parametrlarini optimallashtirish va geomexanik risklarni tizimli boshqarish. Taklif etilgan yondashuv xalqaro tajribada alohida sinovdan o‘tgan usullarni sintez qilib, mahalliy sharoitga moslashtirilgan yangi ilmiy-amaliy tizim sifatida asoslanadi. Keyingi tadqiqot bosqichida Qalmoqqir konidan real ma’lumotlar yig‘ilib, taklif etilgan formulalar va model natijalari amaliy tekshiruvdan o‘tkaziladi, bu esa metodikaning ishonchliligini raqamli tasdiqlash imkonini beradi.

Adabiyotlar ro‘yxati / Список литературы / References

1. Яковлев В.Л., Яковлев А.В., Шимкив Е.С., Соколов В.В. Систематизация геомеханических рисков нарушения устойчивости бортов и уступов карьеров // Известия УГГУ. — 2025. — DOI: 10.25635/2313-1586.2025.03.095.

2. Zhao C., Liang Z., Li L., Li W., Wang S., Lang Y. Microseismic monitoring-based stability analysis of high rock slopes in deep open-pit mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2026. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2026.02.028.

3. Wang Z., Li A., Yang T. Research on upper bound limit analysis of slope stability in open-pit mine based on least square principle // Heliyon. — 2024. — Vol. 10, No. 17. — e37005. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e37005.

4. Тимофеева Ю.В., Суксова С.А., Усольцева Л.А. Контроль устойчивости бортов карьера с помощью радиолокаторов MSR // Вестник Евразийской науки. — 2020. — Т. 4, № 12.

5. Заиров Ш.Ш., Номдоров Р.У., Билдюк Е.В., Олимов Ф.М. Способ повышения устойчивости бортов карьера путем формирования вогнутого профиля откоса высокого уступа // Горная промышленность. — 2024. — № 2(4-1). — DOI: 10.70769/3030-3214.SRT.2.4-1.2024.15.

6. Хусан Б., Мустафин С.А., Ескенова Г.Б., Асанова Ж.М. Методика определения влияющих факторов на устойчивость бортов карьера при ведении буровзрывных работ // Горный журнал Каз. — 2024. — № 10.

7. Wang Z., Hu B., Ma Y., Yuan L., Li J., Zhong Z., Kong Z. Blasting vibration analyses of open-pit mine slope // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2026. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2025.11.010.

8. Каган М.М., Чернобров Д.С. Мониторинг сейсмоактивности прибортового массива карьера на основе сейсморегистраторов в глубоких скважинах за конечным контуром // Горная промышленность. — 2023. — № S1. — С. 84-88. — DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-84-88.

9. Лазарев И.А., Киселев Ф.Б. Численный алгоритм расчета коэффициента запаса устойчивости бортов карьера // Конференция «Ломоносов-2024». МГУ им. М.В. Ломоносова, Мех.-математический факультет. — 2024.

10. Hoek E., Bray J.D. Rock Slope Engineering: Third Edition. — London: CRC Press, 1981.

11. Norqulov N.B. Qalmoqqir ochiq konining qazib olish tizimi va burg‘ulash-portlatish ishlari yordamida qazib olishga tayyorlash // Development of science. — 2026. — Volume 12. — B. 310-315. — ISSN 3030-3907.

12. Boymurodov N.A., Islomov E.O. Qalmoqqir koni rudalarida foydali komponentlarning joylashish shakllari va boyitish samaradorligini oshirish usullari // Development of science. — 2026 May. — Issue 5, Volume 12. — B. 133-142. — ISSN 3030-3907.