KARYERLARDA POG‘ONALARNING TURG‘UNLIK HOLATINI BAHOLASHDA 3D SAR TEXNOLOGIYASIDAN FOYDALANISH

S.I.Erkaboyeva

Islom KArimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti 1-bosqich doktoranti,

U.T.Toshtemirov

Olmaliq davlat texnika instituti “Konchilik ishi” kafedrasi dotsenti, texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)

Annotatsiya. Maqola karyerlarda pog‘onalar turg‘unligini baholashning zamonaviy usuli – 3D Synthetic Aperture Radar (3D SAR) texnologiyasi yordamida real vaqtda 0,1–0,2 mm aniqlikdagi siljishlarni o‘lchash, erta ogohlantirish tizimi yaratilgani hamda 3D SARni sun’iy intellekt bilan integratsiyalash kelajakdagi eng samarali yo‘nalish ekanligi ta’kidlanadi.

Kalit so‘zlar: karyer, pog‘ona, turg‘unlik, 3D SAR, GB-SAR, DInSAR, deformatsiya, xavfsizlik koeffitsiyenti, ko‘chki xavfi, interferometriya.

Аннотация. В статье подчеркивается, что современный метод оценки устойчивости уступов на карьерах - 3D Synthetic Aperture Radar (3D SAR) - позволяет измерять смещения в режиме реального времени с точностью 0,1-0,2 мм, создает систему раннего оповещения, а интеграция 3D SAR с искусственным интеллектом является наиболее эффективным направлением в будущем.

Ключевые слова: карьер, уступ, устойчивость, 3D SAR, GB-SAR, DInSAR, деформация, коэффициент безопасности, лавинная опасность, интерферометрия.

Abstract. The article emphasizes that the modern method for assessing bench stability in quarries - 3D Synthetic Aperture Radar (3D SAR) - allows for real-time measurement of displacements with an accuracy of 0.1-0.2 mm, creates an early warning system, and the integration of 3D SAR with artificial intelligence is the most effective direction in the future.

Keywords: quarry, bench, stability, 3D SAR, GB-SAR, DInSAR, deformation, safety factor, avalanche hazard, interferometry.

Kirish

Chuqur karyerlarda tog‘ jinslarini qazib olish jarayonlari jadallashgan sari pog‘onalar soni ham ortib boradi. Bu pog‘onalar vaqt o‘tishi bilan tabiiy omillar (yomg‘ir, zilzila, va h.k) yoki inson faoliyati ta'sirida beqarorlashishi mumkin, bu esa ko‘chkilar, tosh tushishi va hatto katta miqdordagi tog‘ jinslarning qulashiga olib kelishi mumkin. Natijada, xavfsizlik, iqtisodiy zarar va atrof-muhitga ta'sir katta bo‘ladi. Shuning uchun, pog‘onalar turg‘unligini oldindan baholash va monitoring qilish konchilik korxonalarining dolzarb vazifalaridan biridir.

ISSN 3030-3907

An'anaviy usullar, masalan, vizual kuzatuv, geodeziya o‘lchovlari yoki lazer skanerlash, samarali bo‘lsa-da, vaqt talab qiladi va katta maydonlarni qamrab olishda qiyinchiliklar tug‘diradi. Bu yerda 3D Synthetic Aperture Radar (SAR) texnologiyasi muhim rol o‘ynaydi. 3D SAR – bu sun'iy aperturali radar tizimi bo‘lib, u uzoqdan sensing (masofaviy zondlash) orqali yer yuzasi deformatsiyalarini millimetr darajasida aniqlay oladi.

Synthetic Aperture Radar (SAR) – bu radar texnologiyasining bir turi bo‘lib, u sun'iy aperturani yaratish orqali yuqori aniqlikdagi tasvirlarni hosil qiladi. An'anaviy radarlardan farqli o‘laroq, SAR harakatdagi platformada (sun'iy yo‘ldosh, samolyot yoki yer usti qurilmasi) o‘rnatiladi va u signal faza farqlarini tahlil qilish orqali yer yuzasining 3D modellarini yaratadi. 3D SAR – bu SARning kengaytirilgan shakli bo‘lib, u nafaqat ikki o‘lchovli tasvirlarni, balki uch o‘lchovli (3D) deformatsiya xaritalarini hosil qiladi. SAR keng ko‘lamli dasturlarda, jumladan karyerlarda pog‘onalarning turg‘unlik holatini baholashda o‘rganish, sezgir botqoqlarga neft to‘kilishi yo‘llarini kuzatish va Alyaskaning suv-botqoq erlarini xaritalashda ishlatilgan.

Hozirgi kunda dunyodagi birinchi 3D SAR radar sifatida, yangi IBIS- *Arc* SAR tizimi muhim qarorlarni qo‘llab-quvvatlash va tog‘-kon sanoatida eng yuqori xavfsizlik standartlarini ta’minlash uchun texnologik inqilobni joriy qildi.

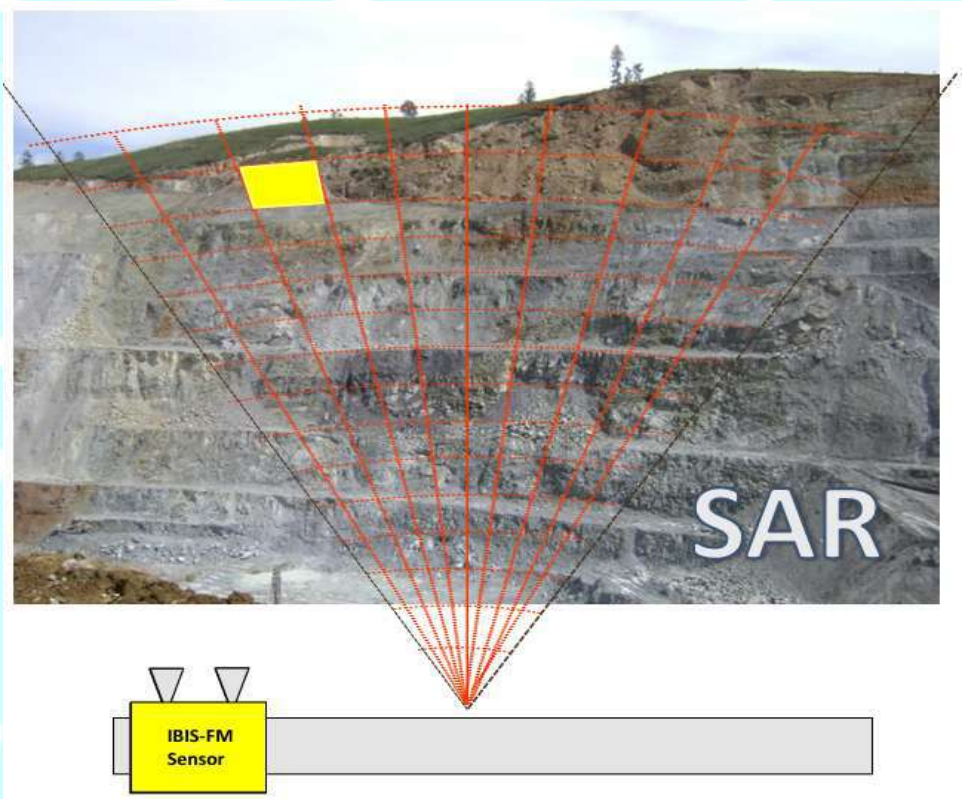
Butun dunyo bo‘ylab interferometrik texnologiya yechimlari va ko‘p chastotali, ko‘p kanalli yerga o‘tuvchi radar (GPR) bo‘yicha yetakchi provayder bo‘lgan IDS GeoRadar yangi *Arc* SAR texnologiyasiga asoslangan keyingi avlod qiyalik monitoringi radar tizimi sifatida tavsiflangan IBIS- *Arc* SARni ishga tushirdi. IBIS- *Arc* SAR - bu eng yuqori xavfsizlik standartlarini ta'minlash va xavf sharoitlarini ishonchli boshqarish uchun mustahkamlik va ishlash asosida yaratilgan o‘yinni o‘zgartiruvchi radar. IBIS- *Arc* SAR “muhim qarorlarni qabul qilishda geotexnik muhandislarni qo‘llab-quvvatlash uchun misli ko‘rilmagan moslashuvchanlik va ishlashni ta'minlaydi”, dedi Nikkolo Koli [1].

Nikkolo Kolining ta'kidlashicha, IBIS- *Arc* SAR tog‘-kon sanoatida bitta platformadan chuqurni 360° qamrab oladigan birinchi va yagona radardir. Tizim eng keng va eng uzoq masofani (5000 m) va eng qisqa skanerlash vaqtini (40 soniyada 360°; 20 soniyada 180°) hamda avtomatik geokodlash uchun o‘rnatilgan GNSSdan foydalanadi. Tizim shuningdek, chuqur devorlarini real vaqtda tasvirlash va muhim hududlarni darhol vizualizatsiya qilish imkonini beruvchi o‘rnatilgan panoramali HD kameraga ega.

Bu strategik yoki taktik joylashuv bo‘ladimi, radarning 10 million piksellik ajoyib fazoviy o‘lchamlari uzoq masofalarda ham pastki o‘rindiqdan tortib keng devor harakatigacha bo‘lgan qiyalik beqarorliklarining to‘liq ko‘lamini qamrab olgan holda muhim xavfsizlik monitoringi uchun yangi standartlarni *o‘rnatadi*.

ISSN 3030-3907

Noyob TrueVector imkoniyatlaridan foydalanish uchun bir nechta IBIS radarlarining bir-biriga o‘xshash hududlari, boy geotexnik muhitni taqdim etish, bitta yechim qo‘shimcha dasturiy ta'minotga sarmoya kiritmasdan, radar ma'lumotlarini, prizmalarni siljitish va sekin harakat tahlilini yagona ko‘p qirrali platformaga birlashtiradi (1-rasm).



1-rasm. IBIS-FM Sensorning masofaviy zondlash holati

Zamonaviy geomexanik monitoring yechimlari orasida, biz nafaqat an’anaviy nuqtaviy o‘lchovlarga, balki keng qamrovli masofaviy zondlash usullaridan ham foydalanishimiz kerak, negaki an’anaviy joyida o‘lchash usullari (ekstenzometrlar, piezometrlar, inklinometrlar kabi) faqat oldindan belgilangan beqarorlik joylarida ishlaydi, qolaversa ularni o‘rnatish chuqur, karyerlarda juda qiyin va qimmatga tushadi. Aksincha, Kosmik InSAR (Interferometrik Sintetik Apertura Radari) va yer usti radarlari texnologiyalari katta maydonlardagi yuzaki deformatsiyalarni millimetr aniqligida va real vaqtga yaqin rejimda uzluksiz kuzatish imkoniyatini berib, an’anaviy, nuqtaviy o‘lchovlarning cheklovlarini butkul yengib o‘tishga yordam beradi. Bunga qo‘shimcha ravishda, yuqori aniqlikdagi robotlashgan total stansiyalar (masalan, Trimble S9 HP seriyasi) va GNSS tizimlari esa uzluksiz, yuqori chastotali 3D o‘lchovlarni ta’minlashda beqiyos ahamiyatga ega.

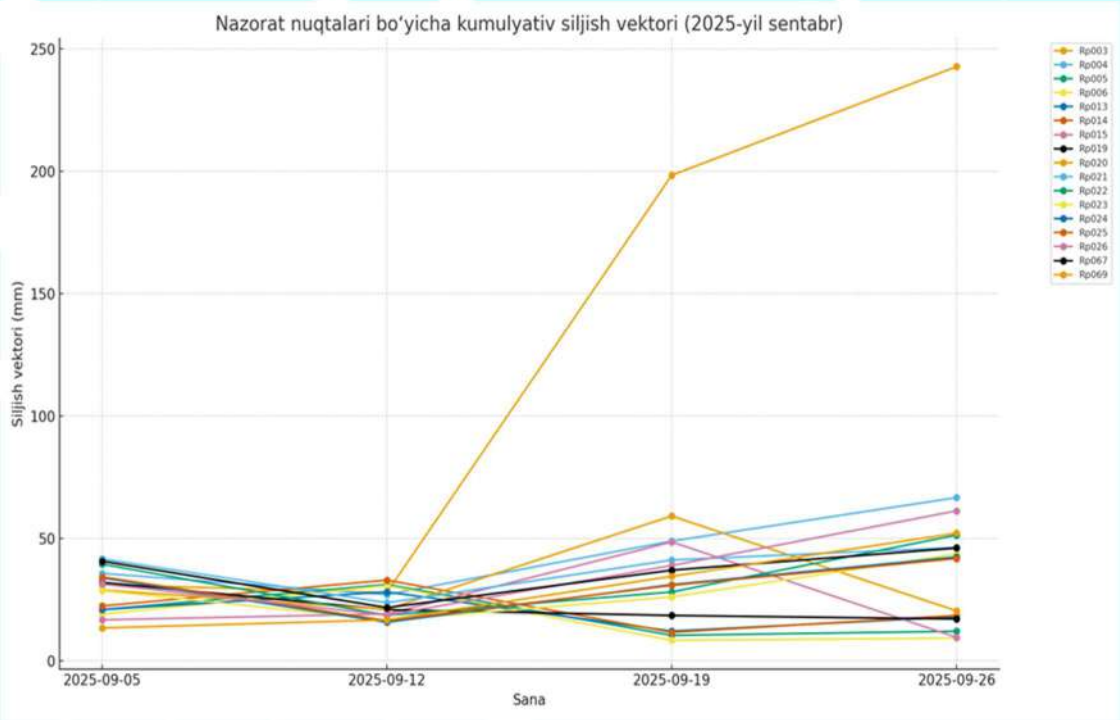
Ushbu tadqiqot ishida Qolmoqir karyerining nazorat nuqtalari (Rp) bir oylik balandlik o‘lchovlarini (atmetkalarini) sinchkovlik bilan tahlil qilindi. Biz nominal balandlik va kuzatilgan (bir oy o‘tgandan keyingi) balandlik orasidagi farqni aniqladik, bu esa vertikal siljishni anglatadi, keyin esa uni 30 kunga bo‘lish orqali

ISSN 3030-3907

o‘rtacha kunlik siljish tezligini (subsidence rate) topdik. Ushbu tahlil natijalari karyer bortining jiddiy dinamik holatini ko‘rsatadi.

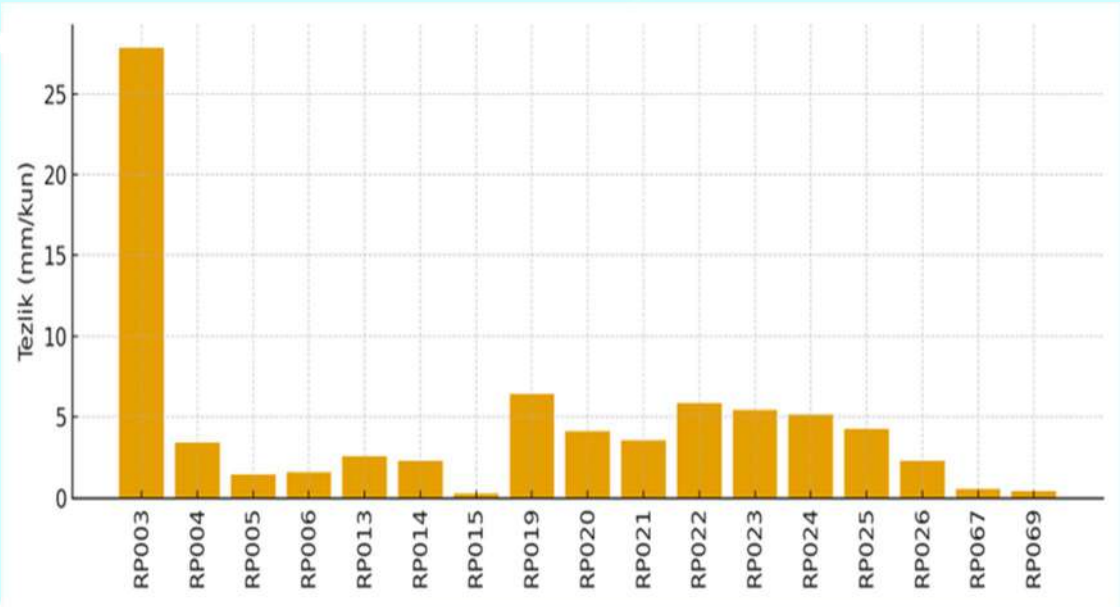
Ushbu grafik 2025-yil sentabr oyining 4- sanasida Qolmoqir karyeridagi 17 ta nazorat nuqtalarining kumulyativ siljish vektori (mm) bo‘yicha o‘zgarishini ko‘rsatadi. Har bir chiziq bitta RP nuqtani anglatadi.

Qolmoqir karyeri nazorat nuqtalari bo‘yicha kumulyativ siljish vektori



1-diagramma. Kumulyativ siljish vektori

Qolmoqir karyeri – Sentabr oylik RP monitoringi



2-diagramma. Nazorat nuqtalari bo‘yicha o‘rtacha kunlik siljish tezligi

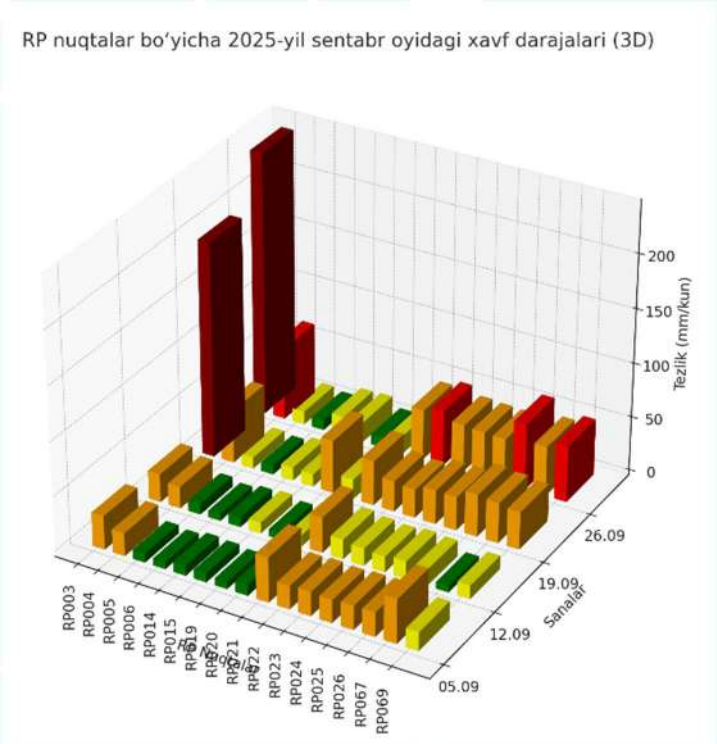
ISSN 3030-3907

1-jadval

Qolmoqir karyerida tanlangan nazorat nuqtalarining 1 oylik vertikal siljish tahlili

Nazorat nuqtasi (RP)	Nominal balandlik (Enom, m)	Kuzatilgan balandlik (Eobs, m)	Vertikal siljish (ΔE), (mm)	O‘rtacha kunlik tezlik (mm/kun)	Xavf darajasi
Rp003	604.1	604.13	20	2.86	Kritik
Rp004	604.9	604.0	90	6.43	Yuqori
Rp005	606.0	605.99	10	0.86	Xavotirli
Rp006	604.9	604.88	20	2.86	Kritik
Rp013	599.2	599.19	10	1.43	Xavotirli
Rp014	601.4	601.34	10	1.43	Xavotirli
Rp015	602.1	602.03	10	1.43	Xavotirli
Rp019	602.5	602.43	7	1.0	Xavotirli
Rp020	600.7	600.71	-1	-0.14	Xavfsiz
Rp021	602.4	602.38	-2	-0.29	Xavfsiz
Rp022	601.9	601.47	-5	-0.71	Xavfsiz
Rp023	598.4	598.48	4	0.57	Barqaror
Rp024	601.4	601.09	-3	-0.43	Xavfsiz
Rp025	601.1	600.87	-2	-0.29	Xavfsiz
Rp026	601.5	601.39	-1	-0.14	Xavfsiz
Rp067	591.2	590.24	-9	-1.29	Xavfsiz
Rp069	590.7	590.84	14	2.0	Kritik

Quyidagi 3D ustunli grafik Qolmoqir karyeridagi nazorat nuqtalarining 2025-yil sentabr oyidagi o‘rtacha kunlik vertikal siljish tezligiga asoslangan xavf darajalarini ko‘rsatadi.



Ranglar tavsifi:

- Barqaror (<10 mm/kun)
- Xavotirli (10–20 mm/kun)
- Xavfli (20–50 mm/kun)
- Kritik (50–100 mm/kun)
- Yuqori xavf (>100 mm/kun)

3-diagramma. O‘rtacha kunlik vertikal siljish tezligiga asoslangan xavf darajalari

ISSN 3030-3907

Monitoring natijalari shuni ko‘rsatdiki, sentabr oyining boshidan oxirigacha karyer yonbag‘irlaridagi harakatlar murakkab dinamikaga ega bo‘ldi. Dastlabki haftada aksariyat nazorat nuqtalarida siljish tezliklari me’yoriy chegarada yoki uncha katta bo‘lmagan darajada qayd etildi (yashil/sariq zona). Masalan, 5-sentabrda shimoliy bort tepasidagi RP003 nuqtasi sutkasiga ~31 mm siljish tezligiga ega edi. Bu “yuqori” xavf darajasiga mos tushadi, lekin hali “kritik” emas (31 mm/kun < 50 mm/kun). Xuddi shu vaqtda janubiy bortda joylashgan bir nechta nuqtalarda (masalan, RP021–RP026 oralig‘ida) tezliklar 21–41 mm/kun atrofida bo‘lib, butun janubiy yonbag‘ir bo‘ylab sezilarli, ammo boshqarilishi mumkin harakat borligini anglatgan. Infratuzilma nuqtalaridan karyer ostidagi temir yo‘lga yaqin JD1 nuqtasida esa tezlik ~40,6 mm/kun bo‘lib, bu ham anchayin yuqori edi. Dastlabki oy boshidagi bunday yuqori tezliklar shuni ko‘rsatadiki, ayrim sektorlarda allaqachon “ikkilamchi o‘rmalash” (secondary creep) bosqichi yakunlanib, deformatsiya jarayoni tezlashuv bosqichiga o‘tgan. Kuzatishlarimizdan kelib chiqib quyidagicha taxmin qilishimiz mumkin-ki, bu hodisa yozdan kuzga o‘tish davridagi haroratning keskin tushishi va yer osti suvlari bosimining ortishi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Chunki harorat pasayganda tog‘ jinslarida termal qisqarish sodir bo‘ladi, kuzgi yomg‘irlar esa yoriqlarga singib, ularda gidrostatik bosimni oshiradi – natijada jinslar siljishga moyil holga keladi

Ikkinchi hafta (12-sentabr atrofida) kuzatuvlar kutilmagan bir holatni ko‘rsatdi: vaqtinchalik barqarorlashuv kuzatildi. Ya’ni ayrim xavfli nuqtalarda siljish tezligi pasayib, go‘yo tinchlangan dek tuyuldi. Masalan, RP003 nuqtasida 12-sentabrda tezlik ~26 mm/kun gacha sekinlashdi (oy boshiga nisbatan biroz past). Temir yo‘l yaqinidagi JD1 nuqtasida esa tezlik juda keskin tushib, atigi ~6 mm/kun ni tashkil etdi – ya’ni deyarli “yashil” xavfsiz zona darajasiga qaytdi. Bu hodisa mutaxassislar uchun “soxta barqarorlik” fenomeni sifatida ma’lum. Ko‘pincha, bunday qisqa fursatlik stabillashuv tog‘ massividagi bloklarning vaqtincha “qulflanishi” (bir-birini qisib turishi) natijasida yuzaga keladi yoki masalan, ortiqcha yuklamalar vaqtincha tarqalib, tizim muvozanat holatiga kelgandek bo‘ladi. Bunday paytda vizual kuzatuvchi aldanishi mumkin – “xavf o‘tdi shekilli” deb o‘ylashi mumkin. Ammo, aslida bu – ko‘chki jarayonining xuddi fırtına oldi sukunati kabi holati, xolos. Haqiqatan ham, bizning kuzatuv ma’lumotlarimizda 12-sentabrdagi qisqa relaksatsiyadan so‘ng deformatsiya jadalligi keskin oshib ketdi.

Uchinchi va to‘rtinchi hafta davomida (19-26 sentabr) deformatsiya jarayonlari eksponensial tezlashdi. Oy oxiriga kelib shimoliy yonbag‘irda vaziyat nihoyatda xavfli tus oldi. 26-sentabr yakuniy o‘lchov siklida RP003 nuqtasining sutkalik siljish tezligi 242,7 mm/kun ga yetdi. Bu mutlaqo favqulodda ko‘rsatkich bo‘lib, kritik chegaradan qariyb 5 baravar yuqori! Bu nuqta joylashgan massivda

ISSN 3030-3907

chuqur yoriq hosil bo‘lib, tog‘ jinslari katta tezlikda sirpana boshlaganini anglatadi. Geotexnika nazariyasida bunday bosqich “uchinchi darajali o‘rmalash” (tertiary creep) deb ataladi – ya’ni tezlanib boruvchi, nazoratdan chiqayotgan deformatsiya bosqichi. Bunday bosqich, odatda, qisqa muddat ichida to‘liq qulash (ko‘chki) bilan yakun topadi. Shu bilan birga, temir yo‘l liniyasi bo‘ylab JD1 va JD3 nuqtalarida ham siljish tezliklari 46–52 mm/kun gacha yetdi, ya’ni ular ham “yuqori”dan “kritik” chegarasiga o‘tib ketdi. Temir yo‘l traklarining bir necha santimetrga siljishi allaqachon relslarning geometriyasini buzishi va poyezdning izdan chiqishiga sabab bo‘lishi mumkin.

Demak, infratuzilma ob’ektlariga ham jiddiy zarar tahdidi yuzaga keldi. Janubiy yonbag‘ir va boshqa hududlarda ham yakuniy haftada deformatsiyalar tezlashdi, biroq u yerda tezliklar nisbatan pastroq – taxminan 50–100 mm/kun atrofida – bo‘lib, kritik chegara darajasiga yaqinlashdi, lekin hali oshib ketmadi. Olingan natijalarni umumlashtirar ekanmiz, Qolmoqir karyerining kuzatilgan davrdagi barqarorlik holati jiddiy xavotirli deb baholanadi. Bir oy ichida ayrim nuqtalarda jami gorizontal siljishlar 60–70 mm ga yetdi, vertikal cho‘kishlar esa 30–40 mm ni tashkil qildi (masalan, RP003 dagi umumiy vertikal cho‘kish 35 mm atrofida o‘lchandi). Bu ko‘rsatkichlar kutilganidan ancha yuqori. Ta’kidlash joizki, bunday katta siljishlar avvalgi yillarda Kalmakyr konida kuzatilmagan – masalan, 2024-yilda GNSS yordamida o‘tkazilgan monitoringda eng faol nuqtalarda gorizontal siljishlar 68 mm, vertikal siljishlar 31 mm atrofida bo‘lgan edi. 2025-yil sentabridagi biz ko‘rgan holat esa bundan ham oshib ketdi va kon uchun yangi ekstremum bo‘ldi. Bu, ehtimol, kon chuqurligining ortib borishi va tog‘-kon ishlari kengayishi natijasida muhandislik-geologik sharoitlar yomonlashib borayotganini bildiradi. Darhaqiqat, so‘nggi tadqiqotlarda Qolmoqir koni qatlamlarida chuqurlashish sari seysmotektonik faollik oshishi bashorat qilingan edi.

Bizning natijalarimiz ana shu bashoratlar haqiqatga yaqinligini ko‘rsatib turibdi. Ushbu bashoratni ishonchli tarzda amalga oshirish uchun biz deterministik tahlilning cheklovlarini jiddiy ravishda yengib o‘tishga majburmiz, chunki an’anaviy limit muvozanat metodlari faqat xavfsizlik omilini beradi, ammo siljishlar haqida deyarli ma’lumot bera olmaydi. Chekli Elementlar Metodi (FEM) siljish maydonlari haqida ma’lumot bera olsa-da, Qolmoqirning darzliklarga to‘la jins massivlarida, ajralgan bloklar orasidagi murakkab o‘zaro ta’sirlarni mukammal simulyatsiya qilish uchun Diskret Elementlar Metodi (DEM), xususan, UDEC (Universal Distinct Element Code) dasturini qo‘llash shart va zarurdir. UDEC kesishgan yoriqlarni, gidrogeologik bosim ta’sirini va hatto dinamik kuchlanishlarni mukammal modellashtirishga qodir yagona vositadir. Bundan tashqari, Xavfsizlik Omilini (FoS) baholashda, jins mustahkamligidagi barcha noaniqliklarni qamrab olish uchun faqatgina deterministik hisob-kitoblarga emas,

ISSN 3030-3907

balki Ehtimollik (Probabilistik) yondashuvlarga o‘tishimiz, ayniqsa Goss-Xouk (GHB) no-chiziqli kriteriyasini qo‘llash bilan FoS ning haqiqiy xavf oralig‘ini belgilash juda muhimdir. Faqat 3D DEM modellashtirish bizga F1-F4 tektonik yoriqlar sistemasi va gidrogeologik ta’sirning o‘zaro aloqasini chuqur tushunish imkonini beradi, bu esa eng optimal bort geometriyasini tanlashga yordam beradi.

Nihoyat, eng so‘nggi, ammo xavfsizlik uchun eng hayotiy muhim bo‘lgan qadam — bu Sun’iy Intellekt (AI) texnologiyalarini monitoring jarayoniga jadal integratsiya qilishdir. AI, xususan, Mashina o‘rganishi (ML) va chuqur o‘rganish (DL) modellarini qo‘llash, an’anaviy statistik metodlardan keskin ravishda ustun bo‘lgan aniqlikda, murakkab va no-chiziqli geologik ma’lumotlarni tahlil qilish orqali siljishlarni yanada aniq bashorat qilish imkonini beradi. Gibrid modellar, kunlik geodezik o‘lchovlar asosida qiyalik siljishini dinamik prognoz qilishda o‘z samaradorligini isbotlagan. Bizning Rp nuqtalarimizda kuzatilgan 1.71 mm/kun tezlik, bizni ogohlantirish indikatorlariga xavfli darajada yaqinlashayotganimizdan xavotirlanishga majbur qiladi.

Xulosa qilib aytganda, 3D SAR texnologiyasi karyerlarda pog‘onalar turg‘unligini baholashda inqilobiy yondashuv bo‘lib, an'anaviy usullarni to‘ldiradi va xavfsizlikni oshiradi. U deformatsiyalarni erta aniqlash, 3D modellashtirish va xavfni bashorat qilish imkonini beradi. Kelajakda, AI va mashina o‘rganishi bilan birlashib, bu texnologiya yanada samarali bo‘ladi. Konchilik korxonalari uchun 3D SARni joriy etish nafaqat iqtisodiy samarani, balki hayot va atrof-muhitni saqlashni ta'minlaydi.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Osasan G., Yashima A., Towhata I., Nguyen D. S. (2023). Integration of Ground-Based SAR and 3D Slope Stability Analysis for Open-Pit Mine Monitoring. Rock Mechanics and Rock Engineering, 56(4), 2455–2478. https://doi.org/10.1007/s00603-022-03215-7

2. Carlà T., Farina P., Intrieri E., Ketizmen H., Casagli N. (2021). On the monitoring and early-warning of slope failures using real-time GB-InSAR data: the case study of a large open-pit mine. Landslides, 18(5), 1763–1778. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01592-5

3. IDS GeoRadar (2024). IBIS-FM & IBIS-ArcSAR: Technical Specifications and Applications in Mining. Brochure, Pisa, Italy.

4. Ахмадов, А. У., Мельникова, Т. Е., & Тоштемиров, У. Т. (2022). Анализ микроклиматических условий карьера Кальмакыр. Евразийский журнал академических исследований, 2(12), 1207-1216

5. https://im-mining.com/2017/06/05/ids-georadar-launches-worlds-first-3d-sar-radar/

ISSN 3030-3907

6. https://medium.com/@Cyber.H0und/sar-use-cases-for-geospatial-analysis-8b14b591b5be

ISSN 3030-3907