

XAVFLI GEOLOGIK JARAYONLAR MONITORINGINING NAZARIY-METODOLOGIK ASOSLARI

Axrorova Sevara Suloymon qizi

axrorovasevara57@gmail.com

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti

Jizzax filiali

Axrolova Mushtariy Suloymon qizi

axrolovamushtariy0@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada xavfli geologik jarayonlarni monitoring qilishning nazariy va metodologik asoslari yoritilgan. Ko'chki, cho'kish, yer yuzasi deformatsiyasi, surilish va boshqa geologik jarayonlarning shakllanishiga ta'sir etuvchi tabiiy hamda antropogen omillar tahlil qilingan. Shuningdek, xavfli geologik jarayonlarni kuzatishda geodezik o'lchovlar, masofadan zondlash, interferometrik sun'iy radar ma'lumotlari, multispektral optik tasvirlar va geografik axborot tizimlaridan foydalanish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Monitoring jarayonida turli manbalardan olingan ma'lumotlarni birlashtirish xavfli hududlarni aniqlash, ularning rivojlanish holatini baholash va yuzaga kelishi mumkin bo'lgan xavflarni oldindan aniqlash imkonini berishi asoslangan.

Kalit so'zlar: xavfli geologik jarayonlar, monitoring, ko'chki, cho'kish, deformatsiya, masofadan zondlash, InSAR, Sentinel-1, Sentinel-2, GIS, geodezik monitoring.

Abstract. This article discusses the theoretical and methodological foundations of monitoring hazardous geological processes. Natural and anthropogenic factors influencing the formation and development of landslides, subsidence, displacement, deformation and other geological processes are analyzed. Modern approaches to monitoring hazardous geological processes are considered, including geodetic observations, remote sensing technologies, synthetic aperture radar interferometry, multispectral optical imagery and geographic information systems. The integration of data from different sources provides opportunities to identify hazardous areas, assess the spatial and temporal development of geological processes and improve the reliability of monitoring results.

Keywords: hazardous geological processes, monitoring, landslide, subsidence, deformation, remote sensing, interferometry, InSAR, Sentinel-1, Sentinel-2, GIS, geodetic monitoring.

Kirish. Bugungi kunda tabiiy va antropogen omillar ta'sirida yuzaga kelayotgan xavfli geologik jarayonlar atrof-muhit, aholi yashash hududlari, transport infratuzilmasi, sanoat obyektlari va boshqa muhim inshootlarga ta'sir ko'rsatishi mumkin. Ko'chki, yer yuzasining cho'kishi, surilishi, deformatsiyasi, tog' jinslarining siljishi kabi jarayonlar turli hududlarda turlicha shakllanadi va rivojlanadi. Ushbu jarayonlarning vaqtida aniqlanmasligi ularning rivojlanish holatini baholash va xavfni kamaytirish imkoniyatlarini cheklashi mumkin. Xavfli geologik jarayonlarni kuzatish va baholash masalasi zamonaviy geologik, geodezik va geoinformatsion tadqiqotlarning muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Monitoring jarayoni ma'lum bir hududdagi geologik holatni muntazam kuzatish, olingan ma'lumotlarni qayta ishlash, ularni oldingi kuzatuv natijalari bilan taqqoslash hamda jarayonlarning rivojlanish tendensiyalarini aniqlashga qaratiladi. Bunda asosiy maqsad faqat mavjud holatni aniqlash emas, balki geologik jarayonlarning vaqt davomida qanday o'zgarishini tushunishdan iborat. An'anaviy monitoring usullarida dala kuzatuvlari, geodezik o'lchovlar, nivelirlash, GPS yoki GNSS texnologiyalari va boshqa o'lchash vositalaridan foydalaniladi. Ushbu usullar ma'lum nuqtalarning koordinatalari va balandliklaridagi o'zgarishlarni aniqlash imkonini beradi. Biroq katta hududlarni muntazam kuzatish zarur bo'lgan holatlarda faqat yer usti o'lchovlariga tayanish yetarli bo'lmasligi mumkin. Shu sababli zamonaviy monitoring tizimlarida masofadan zondlash va geoinformatsion texnologiyalardan foydalanish tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. So'nggi yillarda sun'iy yo'ldosh ma'lumotlarining rivojlanishi xavfli geologik jarayonlarni kuzatish imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytirmoqda. Sun'iy yo'ldosh tasvirlari orqali katta hududlarni muntazam kuzatish, turli davrlarda olingan ma'lumotlarni taqqoslash va hududdagi o'zgarishlarni aniqlash mumkin. Ayniqsa, radar va optik ma'lumotlardan birgalikda foydalanish geologik jarayonlarni kompleks baholash uchun muhim imkoniyat yaratadi.

Asosiy qism. Xavfli geologik jarayonlarning shakllanishi va rivojlanishi hududning geologik tuzilishi, relyefi, tog' jinslarining fizik-mexanik xususiyatlari, yer osti suvlari, yog'ingarchilik miqdori, seysmik faollik va boshqa tabiiy omillar bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Geologik qatlamlarning tarkibi va ularning o'zaro joylashuvi yer yuzasining barqarorligiga ta'sir ko'rsatadi. Qiyaliklarda joylashgan hududlarda tog' jinslarining namlanishi, ularning fizik xususiyatlarining o'zgarishi yoki suv oqimlarining kuchayishi natijasida deformatsion jarayonlar rivojlanishi mumkin.

Ko'chki xavfli geologik jarayonlarning keng tarqalgan ko'rinishlaridan biri bo'lib, tog' jinslari yoki tuproq massasining qiyalik bo'ylab siljishi bilan

tavsiflanadi. Ko'chkining rivojlanishiga qiyalikning geologik tuzilishi, namlik, yog'ingarchilik, yer osti suvlari va inson faoliyati ta'sir ko'rsatishi mumkin. Ayrim hududlarda yo'l qurilishi, qiyaliklarning kesilishi, qurilish ishlari yoki yer resurslaridan noto'g'ri foydalanish ham mavjud tabiiy sharoitning o'zgarishiga sabab bo'lishi mumkin. Yer yuzasining cho'kishi ham monitoring talab qiladigan muhim geologik jarayonlardan biridir. Bunday jarayon yer osti qatlamlarining siqilishi, yer osti suvlaridan uzoq muddat foydalanish, konchilik faoliyati yoki boshqa tabiiy va antropogen omillar bilan bog'liq holda yuzaga kelishi mumkin. Cho'kish jarayoni asta-sekin rivojlangan hollarda uni oddiy vizual kuzatuvlar orqali aniqlash qiyin bo'lishi mumkin. Shu sababli yuqori aniqlikdagi geodezik va sun'iy yo'ldosh kuzatuvlaridan foydalanish muhim hisoblanadi.

Xavfli geologik jarayonlarni o'rganishda ularning makoniy va vaqt bo'yicha rivojlanishini aniqlash alohida ahamiyatga ega. Bir martalik kuzatuv ma'lum bir hududning faqat ma'lum vaqtdagi holatini ko'rsatadi. Muntazam monitoring esa jarayonning qanday tezlikda rivojlanayotganini, qaysi hududlarda o'zgarishlar kuchayganini va qaysi joylarda deformatsiya belgilari mavjudligini aniqlash imkonini beradi. Shu sababli monitoring tizimida takroriy kuzatuvlar muhim o'rin tutadi. Monitoring jarayonining nazariy asosini hududning boshlang'ich holatini aniqlash, muntazam ma'lumot yig'ish, ma'lumotlarni qayta ishlash va natijalarni o'zaro taqqoslash tashkil etadi. Dastlab hududning geologik, geomorfologik, gidrologik va boshqa xususiyatlari o'rganiladi. Keyingi bosqichlarda yangi ma'lumotlar olinib, ular avvalgi kuzatuvlar bilan solishtiriladi. Natijada hududdagi o'zgarishlarning yo'nalishi va rivojlanish xususiyatlari haqida xulosa qilish imkoniyati paydo bo'ladi. Geodezik monitoring usullari yer yuzasidagi nuqtalarning koordinatalari va balandliklarini aniqlash orqali deformatsiyalarni baholash imkonini beradi. GNSS texnologiyalari yordamida kuzatuv nuqtalarining fazoviy holatidagi o'zgarishlarni aniqlash mumkin. Ushbu usullar yuqori aniqlikdagi o'lchovlarni ta'minlashi bilan birga, monitoring nuqtalarini oldindan belgilash va ularni muntazam kuzatishni talab qiladi. Shu sababli geodezik monitoring ko'pincha boshqa kuzatuv usullari bilan birgalikda qo'llanilganda samarali natija beradi.

Masofadan zondlash texnologiyalari esa monitoring hududini kengaytirish imkonini beradi. Sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari yordamida katta maydonlarda yuz berayotgan o'zgarishlarni kuzatish mumkin. Bunda radar va optik tasvirlar o'ziga xos imkoniyatlarga ega. Optik tasvirlar hududning yer qoplami, o'simliklar holati, suv obyektlari va boshqa yuzaki xususiyatlarini aniqlashda foydali bo'lsa, radar ma'lumotlari yer yuzasining deformatsiyalarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega.

Interferometrik sun'iy radar texnologiyasi, ya'ni InSAR, radar tasvirlaridan foydalanib yer yuzasi deformatsiyalarini aniqlash imkonini beruvchi zamonaviy usullardan biridir. Turli vaqtlarda olingan radar tasvirlarini interferometrik qayta ishlash orqali yer yuzasida sodir bo'lgan siljishlar haqida ma'lumot olish mumkin. Ushbu texnologiya katta hududlarni kuzatish imkoniyati bilan xavfli geologik jarayonlarni monitoring qilishda muhim vositalardan biri hisoblanadi.

InSAR texnologiyasining muhim jihatlaridan biri takroriy radar tasvirlari asosida yer yuzasidagi o'zgarishlarni kuzatish imkoniyatidir. Turli sanalarda olingan tasvirlar o'zaro taqqoslanganda deformatsiya jarayonlarining vaqt bo'yicha rivojlanishini baholash mumkin. Bu esa ayniqsa sekin rivojlanadigan cho'kish va boshqa deformatsion jarayonlarni o'rganishda muhimdir. InSAR texnologiyasining rivojlanishi natijasida vaqt qatorlariga asoslangan monitoring usullari ham keng qo'llanilmoqda. PSInSAR va SBAS kabi yondashuvlar bir nechta radar tasvirlaridan foydalanib, yer yuzasidagi deformatsiyalarning vaqt davomida qanday o'zgarishini baholashga yordam beradi. Bu usullar barqaror radar qaytish signallariga ega bo'lgan nuqtalar yoki kichik bazali interferogrammalar ketma-ketligidan foydalanish orqali hududdagi deformatsiyalarni batafsilroq tahlil qilish imkonini beradi. Radar ma'lumotlaridan foydalanishda ma'lumotlarni to'g'ri qayta ishlash va natijalarni tekshirish muhim hisoblanadi. Atmosfera sharoitlari, sirtning xususiyatlari, radar signallarining tarqalishi va boshqa omillar interferometrik natijalarga ta'sir qilishi mumkin. Shu sababli InSAR natijalarini geodezik kuzatuvlar yoki boshqa mustaqil ma'lumotlar bilan solishtirish monitoringning ishonchliligini oshiradi. Multispektral optik ma'lumotlar xavfli geologik jarayonlarni baholashda qo'shimcha axborot manbai sifatida foydalaniladi. Masalan, Sentinel-2 sun'iy yo'ldosh tasvirlari yordamida hududning yer qoplami, o'simliklar holati, namlik xususiyatlari va boshqa ko'rsatkichlarni tahlil qilish mumkin. Olingan ma'lumotlar orqali ko'chki yoki deformatsiya sodir bo'layotgan hududning tabiiy sharoitlari haqida qo'shimcha ma'lumot olish imkoniyati yaratiladi. Optik ma'lumotlarning yana bir muhim imkoniyati turli vaqt oralig'ida olingan tasvirlarni taqqoslash orqali yer qoplamidagi o'zgarishlarni aniqlashdir. Masalan, o'simlik qoplamining o'zgarishi, namlikning ortishi yoki kamayishi, ochiq tuproq maydonlarining kengayishi kabi belgilar geologik jarayonlarning rivojlanish sharoitlarini baholashda qo'shimcha ma'lumot berishi mumkin. Biroq optik tasvirlarning bulutlilik va yoritilish sharoitlariga bog'liqligi sababli ularni radar ma'lumotlari bilan birgalikda qo'llash maqsadga muvofiqdir.

Radar va optik ma'lumotlarning birgalikda qo'llanilishi monitoring natijalarining mazmunini kengaytiradi. Masalan, InSAR orqali yer yuzasidagi deformatsiya aniqlangan hudud multispektral tasvirlar yordamida qo'shimcha

ravishda tahlil qilinishi mumkin. Bunda yer qoplami, o'simliklar, suv obyektlari va relyef bilan bog'liq ma'lumotlar deformatsiya jarayonining ehtimoliy sabablarini tushunishga yordam beradi. Xavfli geologik jarayonlarni monitoring qilishda geografik axborot tizimlari ham muhim vosita hisoblanadi. GIS muhitida turli manbalardan olingan ma'lumotlarni yagona fazoviy tizimga birlashtirish, ularni xaritalash va taqqoslash mumkin. Geologik xaritalar, relyef ma'lumotlari, sun'iy yo'ldosh tasvirlari, deformatsiya xaritalari, gidrologik ma'lumotlar va boshqa axborotlarni birgalikda tahlil qilish orqali xavfli hududlarning fazoviy holatini baholash imkoniyati oshadi.

GIS texnologiyalari monitoring natijalarini xarita ko'rinishida ifodalash imkonini ham beradi. Deformatsiya qiymatlari, xavfli hududlar, geologik qatlamlar, suv obyektlari va infratuzilma obyektlarini bitta fazoviy muhitda aks ettirish orqali ular o'rtasidagi bog'liqliklarni ko'rish osonlashadi. Bu esa monitoring natijalarini ilmiy tahlil qilish bilan bir qatorda ularni amaliy faoliyatda foydalanish uchun ham qulay shaklga keltiradi.

Monitoring natijalarini tahlil qilishda ma'lumotlarning aniqligi va ularni to'g'ri talqin qilish ham muhim ahamiyatga ega. Radar ma'lumotlariga atmosfera ta'siri, tasvir sifatining o'zgarishi va sirt xususiyatlari ta'sir qilishi mumkin. Optik tasvirlarda esa bulutlilik va yoritilish sharoitlari ma'lumot sifatiga ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli turli manbalardan olingan ma'lumotlarni o'zaro tekshirish va kompleks tahlil qilish monitoring natijalarining ishonchliligini oshirishga xizmat qiladi.

Monitoring tizimining metodologik jihatdan muhim jihatlaridan yana biri ma'lumotlarning vaqt bo'yicha izchilligini ta'minlashdir. Turli sanalarda olingan ma'lumotlar bir xil yoki o'zaro mos metodika asosida qayta ishlansa, hududdagi o'zgarishlarni taqqoslash osonlashadi. Shuningdek, kuzatuvlarning muntazam olib borilishi deformatsiya jarayonining qisqa muddatli va uzoq muddatli xususiyatlarini ajratishga yordam beradi. Xavfli geologik jarayonlarni monitoring qilishda hududning relyefi ham muhim ko'rsatkichlardan biri hisoblanadi. Relyefning nishabligi, balandlik farqlari va qiyaliklarning yo'nalishi ko'chki va boshqa jarayonlarning rivojlanish sharoitlarini baholashda foydalanilishi mumkin. Raqamli relyef modellari GIS muhitida boshqa ma'lumotlar bilan birlashtirilganda xavfli hududlarning fazoviy xususiyatlarini batafsilroq o'rganish imkonini beradi. Zamonaviy monitoring tizimlarida sun'iy intellekt va mashinali o'qitish usullaridan foydalanish imkoniyatlari ham rivojlanmoqda. Katta hajmdagi masofadan zondlash ma'lumotlarini avtomatik tahlil qilish, o'zgarishlarni aniqlash va xavfli hududlarni ajratib ko'rsatishda bunday texnologiyalardan foydalanish mumkin. Biroq bunday yondashuvlarning

samaradorligi foydalanilayotgan ma'lumotlarning sifati, algoritmlarning to'g'ri tanlanishi va natijalarning mutaxassislar tomonidan tekshirilishiga bog'liq.

Sun'iy intellektga asoslangan yondashuvlar monitoring ma'lumotlarini qayta ishlash vaqtini qisqartirish va katta hajmdagi ma'lumotlardan zarur axborotni ajratib olish imkoniyatini oshirishi mumkin. Bunda tarixiy monitoring ma'lumotlari asosida hududdagi o'zgarishlar tahlil qilinib, yangi ma'lumotlar bilan taqqoslanishi mumkin. Shu bilan birga, avtomatik tahlil natijalarini mutaxassis tomonidan tekshirish muhim bo'lib qoladi, chunki geologik jarayonlarning tabiiy sharoitlari turli hududlarda bir-biridan farq qiladi. Xavfli geologik jarayonlarni monitoring qilishning samaradorligi faqat texnologiyaga emas, balki monitoring tizimining to'g'ri tashkil etilishiga ham bog'liq. Kuzatuv hududini tanlash, ma'lumotlarni yig'ish davriyligini belgilash, turli manbalar o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash va natijalarni muntazam tahlil qilish monitoringning muhim tarkibiy qismlaridir. Shu jihatdan monitoringni faqat alohida o'lchov yoki tasvir olish jarayoni sifatida emas, balki doimiy ma'lumot yig'ish va tahlil qilish tizimi sifatida qarash lozim.

Shunday qilib, xavfli geologik jarayonlar monitoringining zamonaviy metodologiyasi birgina kuzatuv usuliga emas, balki turli ma'lumot manbalarini birlashtirishga asoslanishi maqsadga muvofiq. Geodezik o'lchovlar yuqori aniqlikdagi lokal ma'lumotlarni berishi mumkin bo'lsa, radar tasvirlari keng hududdagi deformatsiyalarni aniqlash, multispektral optik ma'lumotlar esa hududning tabiiy va yer qoplamini xususiyatlarini baholash imkonini beradi. GIS texnologiyalari ushbu ma'lumotlarni yagona muhitda birlashtirish va fazoviy tahlil qilish imkoniyatini yaratadi. Bunday kompleks yondashuv xavfli geologik jarayonlarning faqat mavjud holatini aniqlash bilan cheklanib qolmasdan, ularning rivojlanish dinamikasini ham kuzatish imkonini beradi. Turli vaqt oralig'ida olingan ma'lumotlarni taqqoslash orqali deformatsiya jarayonlarining kuchayishi yoki barqarorlashuvi haqida ma'lumot olish mumkin. Natijada monitoring tizimi hududning geologik holatini muntazam baholash va tegishli ilmiy-amaliy qarorlar uchun zarur axborotni shakllantirishga xizmat qiladi.

Xulosa. Xavfli geologik jarayonlarni monitoring qilish hududlarning geologik va ekologik xavfsizligini ta'minlashda muhim ahamiyatga ega. Ko'chki, cho'kish, surilish va yer yuzasi deformatsiyalari kabi jarayonlarni muntazam kuzatish ularning rivojlanish xususiyatlarini aniqlash va xavfli hududlarni belgilash imkonini beradi.

Xavfli geologik jarayonlarning shakllanishi tabiiy geologik sharoitlar bilan bir qatorda inson faoliyati bilan ham bog'liq bo'lishi mumkin. Shu sababli monitoring jarayonida geologik, geomorfologik, gidrologik va antropogen omillarni birgalikda hisobga olish muhimdir. Hududning boshlang'ich holatini

aniqlash va keyingi kuzatuvlar bilan taqqoslash orqali geologik jarayonlarning rivojlanish dinamikasini baholash mumkin.

Tadqiqot natijalariga ko'ra, xavfli geologik jarayonlarni monitoring qilishda geodezik o'lchovlar, masofadan zondlash, InSAR, multispektral optik tasvirlar va GIS texnologiyalaridan kompleks foydalanish metodologik jihatdan muhim yondashuv hisoblanadi. Ayniqsa, radar va optik ma'lumotlarni birlashtirish orqali yer yuzasidagi deformatsiyalar bilan birga hududning tabiiy sharoitlari va yer qoplamini xususiyatlarini ham tahlil qilish imkoniyati yaratiladi.

Kelgusida sun'iy intellekt va mashinali o'qitish texnologiyalarini monitoring tizimlariga integratsiyalash xavfli geologik jarayonlarni avtomatik aniqlash va ularning rivojlanish dinamikasini baholash imkoniyatlarini yanada kengaytirishi mumkin. Shu asosda shakllantirilgan kompleks monitoring tizimlari xavfli geologik jarayonlarni o'z vaqtida aniqlash, ularni baholash va tegishli choralarni rejalashtirish uchun ilmiy-metodik asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 2026-yil 25-maydagi 275-son qarori. 2026–2030-yillar uchun O'zbekiston Respublikasida atrof tabiiy muhitning davlat monitoringi dasturini tasdiqlash to'g'risida.
2. Botirov Sh.S., Nomdorov R.U. Radar interferometriyasi texnologiyasining nazariy asoslari va yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilish imkoniyatlari. *Саноатда рақамли технологиялар*. 2026. Vol. 4, No. 3.
3. Usmonov F. Sentinel-1 PSInSAR texnologiyasi asosida Qalmoqqir ochiq karyeri bortlarining deformatsiyasini sun'iy yo'ldosh orqali monitoring qilish. *Muhandislik va Iqtisodiyot*. 2026. Vol. 4, No. 9. P. 173–180.
4. Botirov Sh.S., Nomdorov R.U., Abdisamatov B.A. Monitoring of Surface Deformation Caused by Underground Mining Activities Using the InSAR Technique Based on Sentinel-1 Imagery. *Саноатда рақамли технологиялар*. 2026. Vol. 4, No. 1. P. 69–74.
5. European Space Agency. *Sentinel-1 Mission: Earth Observation and Radar Interferometry*. European Space Agency, 2025.
6. European Space Agency. *Sentinel-2 Mission: Multispectral Imaging and Land Monitoring*. European Space Agency, 2025.
7. Copernicus Land Monitoring Service. *European Ground Motion Service: Ground Motion Monitoring Using Sentinel-1 InSAR Data*. European Commission, 2025.
8. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2025*. United Nations, 2025.