

INTERFEROMETRIK SUN'IY RADAR VA MULTISPEKTRAL MA'LUMOTLARNI GEOLOGIK MONITORINGDA QO'LLASH IMKONIYATLARI

Axrolova Mushtariy Suloymon qizi
axrolovamushtariy0@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada interferometrik sun'iy radar va multispektral optik ma'lumotlardan foydalanib, xavfli geologik jarayonlarni aniqlash imkoniyatlari o'rganilgan. InSAR ma'lumotlari asosida yer yuzasi deformatsiyalarini, multispektral tasvirlar yordamida esa yer qoplam va namlikdagi o'zgarishlarni aniqlash yondashuvlari tahlil qilingan. Mazkur ma'lumotlarni kompleks qo'llash geologik jarayonlarni aniqlash va monitoring qilish samaradorligini oshirish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: Interferometrik SAR, InSAR, multispektral ma'lumotlar, xavfli geologik jarayonlar, yer yuzasi deformatsiyasi, ko'chki, surilma, masofadan zondlash, Sentinel-1, Sentinel-2, GIS, geodezik monitoring.

Abstract. This article examines the potential of integrating Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) and multispectral optical data for the detection of hazardous geological processes. The study analyzes the capabilities of InSAR technology for detecting surface deformations and assessing their temporal changes, as well as the role of multispectral data in identifying changes in land cover, vegetation, and surface moisture. The methodological potential of integrating Sentinel-1 radar and Sentinel-2 optical data with NDVI, NDMI, digital elevation models, and GIS analysis is substantiated. The results demonstrate that the combined analysis of multi-source data enables a more comprehensive characterization of deformation processes, identification of potentially hazardous areas, and improvement of geological monitoring efficiency. The proposed approach can serve as a scientific and methodological basis for remote sensing-based monitoring of hazardous geological processes and targeted subsequent geodetic and geological investigations.

Keywords: Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR, multispectral optical data, hazardous geological processes, surface deformation, landslide, remote sensing, Sentinel-1, Sentinel-2, NDVI, NDMI, digital elevation model, GIS, geodetic monitoring.

Kirish. Xavfli geologik jarayonlar Yer yuzasining tabiiy rivojlanishi bilan bog'liq bo'lgan, muayyan hududlarda geologik va geomorfologik sharoitlarning o'zgarishiga olib keluvchi murakkab jarayonlar hisoblanadi. Ko'chki, surilma, yer yuzasining cho'kish, deformatsiyalanishi va boshqa shu kabi jarayonlar tabiiy sharoitlar bilan bir qatorda inson faoliyati ta'sirida ham kuchayishi mumkin. Mazkur jarayonlarning rivojlanishi natijasida

avtomobil va temir yo'llari, turar joy binolari, gidrotexnik inshootlar, kommunikatsiya tarmoqlari hamda boshqa muhim infratuzilma obyektlariga zarar yetishi ehtimoli ortadi. Shu sababli xavfli geologik jarayonlarni o'z vaqtida aniqlash, ularning rivojlanish dinamikasini kuzatish va ehtimoliy xavf zonalarini belgilash zamonaviy geologik monitoringning dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi. Geologik jarayonlarning rivojlanish xususiyatlari hududning geologik tuzilishi, relyefi, tog' jinslarining fizik-mexanik xususiyatlari, yer osti va yer usti suvlari, yog'ingarchilik miqdori, seysmik faollik hamda antropogen yuklama kabi omillar bilan chambarchas bog'liq. Ayniqsa tog'li va tog'oldi hududlarda qiyaliklarning barqarorligi o'zgarishi ko'chki va surilma jarayonlarining shakllanishiga sabab bo'lishi mumkin. Bunday jarayonlarning dastlabki bosqichlarida yuzaga keladigan deformatsiyalar ko'z bilan kuzatish yoki alohida dala o'lchovlari orqali aniqlanishi qiyin bo'lgan holatlar ham mavjud.

Asosiy qism. An'anaviy geologik va geodezik kuzatuvlar xavfli jarayonlarni o'rganishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. Geodezik nivelirlash, GNSS o'lchovlari, reperlar va kuzatuv punktlari yordamida muayyan nuqtalarning koordinatalari hamda balandliklaridagi o'zgarishlarni aniqlash mumkin. Biroq bunday usullar ko'pincha kuzatuv punktlarining mavjudligiga, dala ishlarining tashkil etilishiga va inson resurslariga bog'liq bo'ladi. Katta hududlarni qisqa vaqt oralig'ida muntazam kuzatish zarur bo'lgan holatlarda esa an'anaviy yondashuvlarning imkoniyatlari cheklanishi mumkin. Masofadan zondlash texnologiyalarining rivojlanishi geologik monitoringning mazmunini sezilarli darajada kengaytirdi. Sun'iy yo'ldoshlardan olinadigan ma'lumotlar yordamida katta hududlarni bir xil metodologiya asosida takroriy kuzatish, avvalgi va yangi tasvirlarni taqqoslash hamda hududda yuz berayotgan o'zgarishlarni aniqlash imkoniyati yaratildi. Ayniqsa radar va optik sensorlardan olinadigan ma'lumotlarning o'ziga xos xususiyatlari ularni xavfli geologik jarayonlarni aniqlashda bir-birini to'ldiruvchi manbalar sifatida qo'llash imkonini beradi.

Sun'iy apertura radari (Synthetic Aperture Radar — SAR) faol masofadan zondlash texnologiyasi bo'lib, Yer yuzasidan qaytgan elektromagnit signalni qayd etish orqali tasvir hosil qiladi. Optik sensorlardan farqli ravishda radar tizimlari o'z signalini o'zi hosil qiladi. Shu sababli SAR ma'lumotlaridan turli meteorologik sharoitlarda va kunning turli vaqtlarida foydalanish mumkin. Radar ma'lumotlarining amplitudasi bilan bir qatorda faza axborotini ham saqlashi ularni deformatsiyalarni yuqori aniqlikda aniqlash uchun qo'llash imkonini beradi. Interferometrik SAR yoki InSAR texnologiyasi turli vaqt vaqtlarda olingan SAR tasvirlari orasidagi fazaviy farqlarni tahlil qilishga asoslanadi. Bir xil hududning turli davrlardagi radar tasvirlari o'zaro

taqqoslanganda Yer yuzasidagi siljishlar natijasida radar signalining fazasida o'zgarish yuz beradi. Mazkur o'zgarishlarni matematik qayta ishlash orqali radar ko'rish yo'nalishidagi deformatsiyalarni aniqlash mumkin. InSAR texnologiyasining ilmiy ahamiyati shundaki, u katta hududlarda millimetr va santimetr darajasidagi deformatsiyalarni aniqlash imkonini beradi. Ayniqsa sekin rivojlanadigan ko'chki va surilma jarayonlarini uzoq muddat davomida kuzatish uchun ko'p vaqtli SAR tasvirlaridan foydalanish muhimdir. Shu bilan birga, interferometrik ma'lumotlarning aniqligiga atmosfera ta'siri, radar tasvirlari orasidagi vaqt oralig'i, relyef, sirtning o'zgaruvchanligi va signal koherensiyasi kabi omillar ta'sir qilishi mumkin. Multispektral optik ma'lumotlar xavfli geologik jarayonlarni aniqlashda boshqa turdagi axborotni taqdim etadi. Bunday ma'lumotlarda Yer yuzasi turli spektral diapazonlarda qayd etiladi. Ko'rinadigan, yaqin infraqizil va qisqa to'liqlik infraqizil diapazonlarning birgalikdagi tahlili natijasida vegetatsiya holati, tuproq va sirt namligi, yer qoplamini hamda ularning vaqt bo'yicha o'zgarishini baholash mumkin.

Shunday qilib, InSAR va multispektral optik ma'lumotlar xavfli geologik jarayonlarni turli nuqtayi nazardan tavsiflaydi. InSAR deformatsiyaning fizik-geometrik ifodasini aniqlashga xizmat qilsa, multispektral ma'lumotlar jarayonning yer yuzasidagi qo'shimcha belgilarini aniqlash imkonini beradi. Ushbu ikki turdagi ma'lumotlarni integratsiyalash xavfli geologik jarayonlarni aniqlashning ishonchliligini oshiruvchi muhim ilmiy yondashuv sifatida qaralishi mumkin.

InSAR texnologiyasining asosiy matematik mohiyati ikki xil vaqtga tegishli SAR tasvirlaridagi faza qiymatlarini o'zaro taqqoslashdan iborat. Interferometrik faza farqi umumiy holda quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1,$$

bu yerda φ_1 va φ_2 — birinchi va ikkinchi kuzatuv vaqtlaridagi radar signalining faza qiymatlari, $\Delta\varphi$ — interferometrik faza farqidir. Faza farqining shakllanishida relyef, deformatsiya, atmosfera va texnik xatoliklar kabi bir nechta komponentlar ishtirok etishi mumkin. Shu sababli amaliy InSAR tahlilida deformatsiyaga tegishli komponentni boshqa ta'sirlardan ajratish muhim hisoblanadi. Differensial interferometriya, vaqt qatorlari va kichik bazisli interferogrammalar kabi usullar mazkur masalani hal qilishga qaratilgan. Radar signalining to'liqlik uzunligi va interferometrik faza farqi asosida LOS (Line of Sight) yo'nalishidagi deformatsiyani soddalashtirilgan ko'rinishda quyidagicha ifodalash mumkin:

$$d_{LOS} = \lambda \Delta\varphi / 4\pi.$$

Bu yerda d_{LOS} — radar ko'rish yo'nalishidagi deformatsiya, λ — radar signalining to'liqlik uzunligi, $\Delta\varphi$ — interferometrik faza farqi. Ushbu bog'liqlik radar fazasidagi kichik

o'zgarishlarning Yer yuzasidagi siljishlarni aniqlash uchun qanday foydalanilishini ko'rsatadi.

InSAR ma'lumotlarini amaliy qayta ishlash bir necha ketma-ket bosqichlardan tashkil topadi. Avvalo tadqiqot hududini qamrab oluvchi SAR tasvirlari tanlanadi. Tasvirlar geografik va geometrik jihatdan bir-biriga moslashtiriladi. Keyin interferogramma shakllantiriladi va fazaviy shovqinlar kamaytiriladi. Keyingi bosqichda fazani ochish amalga oshirilib, interferometrik natija deformatsiya xartasiga aylantiriladi. Natijada Yer yuzasining turli qismlarida kuzatilayotgan siljishlarning fazoviy taqsimlanishi haqida ma'lumot olinadi. Bir martalik interferogramma ma'lum ikki kuzatuv davri orasidagi deformatsiyani ko'rsatadi. Biroq xavfli geologik jarayonlarning rivojlanish xarakterini tushunish uchun ko'p vaqtli kuzatuvlar muhimroq hisoblanadi. Bir necha oy yoki yillar davomida to'plangan SAR ma'lumotlaridan foydalanish orqali deformatsiyaning vaqt qatori shakllantirilishi mumkin. Bu esa deformatsiyaning doimiy, davriy, tezlashuvchi yoki sekinlashuvchi xarakterini baholashga imkon beradi. Ko'p vaqtli interferometrik tahlilda Permanent Scatterer InSAR (PS-InSAR) va Small Baseline Subset InSAR (SBAS-InSAR) kabi yondashuvlardan foydalanish mumkin. PS-InSAR uzoq vaqt davomida radar signalini barqaror qaytaruvchi nuqtalarni aniqlashga asoslanadi. Bunday nuqtalar binolar, inshootlar, qoyali yuzalar yoki boshqa nisbatan barqaror obyektlar bo'lishi mumkin. SBAS yondashuvida esa kichik fazoviy va vaqt oralig'iga ega interferogrammalar ketma-ketligi tahlil qilinadi. Har ikki yondashuv sekin kechadigan deformatsion jarayonlarning vaqt dinamikasini aniqlash uchun qo'llaniladi. Biroq InSAR natijalarini talqin qilishda muayyan cheklovlarni hisobga olish lozim. O'simliklar tez o'zgaradigan hududlarda radar tasvirlari orasida koherensiya pasayishi mumkin. Atmosferadagi suv bug'i va boshqa fizik jarayonlar ham interferometrik fazaga ta'sir ko'rsatadi. Bundan tashqari, InSAR asosan radar ko'rish yo'nalishidagi siljishni o'lchaydi. Shu sababli uch o'lchamli deformatsiyani to'liq baholash uchun turli yo'nalishlardan olingan radar ma'lumotlari yoki GNSS kabi qo'shimcha geodezik o'lchovlardan foydalanish maqsadga muvofiq. Multispektral optik ma'lumotlarni tahlil qilish esa geologik jarayonlarning Yer yuzasidagi ekologik va fizik belgilarini aniqlash imkonini beradi. Xususan, vegetatsiya qoplamidagi o'zgarishlar ko'chki yoki surilma jarayonlari rivojlanayotgan hududlarda qo'shimcha indikator bo'lishi mumkin. Vegetatsiya holatini baholash uchun eng ko'p qo'llaniladigan ko'rsatkichlardan biri NDVI hisoblanadi.

NDVI quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red).$$

Bu yerda NIR — yaqin infraqizil diapazondagi aks ettirish qiymati, Red — qizil diapazondagi aks ettirish qiymati. Vegetatsiya holati o'zgarganda ushbu indeksning

qiymati ham o'zgarishi mumkin. Shu sababli turli vaqtga tegishli NDVI xaritalarini taqqoslash orqali o'simlik qoplamidagi o'zgarishlarni aniqlash mumkin. Geologik jarayonlarning rivojlanishida namlik muhim omillardan biri bo'lishi mumkin. Ayniqsa qiyaliklarda tuproq va grunt namligining ortishi ularning mexanik xususiyatlariga ta'sir qilishi va ayrim sharoitlarda ko'chki xavfini oshirishi mumkin. Shu sababli multispektral tasvirlar yordamida namlik holatini baholash monitoring tizimining qo'shimcha komponenti sifatida qaraladi. Namlik o'zgarishlarini baholashda NDMI indeksidan foydalanish mumkin:

$$NDMI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR).$$

Bu yerda NIR — yaqin infraqizil, SWIR — qisqa to'liq infraqizil diapazon. NDMI ning vaqt bo'yicha o'zgarishi hududdagi namlik sharoitining dinamikasini baholashga yordam beradi. Sentinel sun'iy yo'ldoshlarining ma'lumotlari ushbu yondashuvni amalga oshirish uchun muhim axborot manbalaridan biridir. Sentinel-1 missiyasi C-diapazonli SAR ma'lumotlarini taqdim etadi. Uning takroriy kuzatuvlari hududdagi deformatsiyalarni vaqt bo'yicha monitoring qilish uchun foydalanish imkonini beradi. Sentinel-2 esa multispektral optik tasvirlarni taqdim etib, yer qoplamini, vegetatsiya va boshqa sirt xususiyatlarini baholashga imkon beradi. Biroq multispektral indeksning o'zgarishini bevosita geologik jarayonning tasdig'i sifatida qabul qilish ilmiy jihatdan to'g'ri emas. NDVI ning kamayishi mavsumiy vegetatsiya sikli, qurg'oqchilik, qishloq xo'jaligi faoliyati yoki boshqa tabiiy va antropogen omillar bilan ham bog'liq bo'lishi mumkin. Xuddi shuningdek, NDMI o'zgarishi yog'ingarchilik, sug'orish va boshqa namlik manbalari ta'sirida yuzaga kelishi mumkin. Shuning uchun optik ma'lumotlar albatta InSAR, relyef va geologik ma'lumotlar bilan birgalikda tahlil qilinishi kerak.

Raqamli relyef modeli xavfli geologik jarayonlarni aniqlashda yana bir muhim ma'lumot manbai hisoblanadi. Relyefning qiyaligi, balandligi, ekspozitsiyasi va boshqa geomorfologik ko'rsatkichlari geologik jarayonlarning hududiy taqsimlanishini tahlil qilishga yordam beradi. Ayniqsa ko'chki va surilma jarayonlari bilan bog'liq tadqiqotlarda qiyalik ko'rsatkichi muhim omillardan biri sifatida qaraladi. GIS texnologiyalari esa turli manbalardan olingan ma'lumotlarni yagona fazoviy tizimda birlashtirish imkonini beradi. InSAR deformatsiya xaritasi, NDVI va NDMI xaritalari, raqamli relyef modeli, geologik xaritalar va boshqa ma'lumotlar qatlamlar ko'rinishida birlashtirilishi mumkin. Bunday fazoviy integratsiya xavfli jarayonlarning o'zaro bog'liq belgilarini aniqlashga yordam beradi. Ko'p manbali ma'lumotlarni kompleks baholash uchun quyidagi xususiyatlar to'plamidan foydalanish mumkin:

$$X = \{D, \gamma, \Delta NDVI, \Delta NDMI, S, H\}.$$

Bu yerda D — yer yuzasi deformatsiyasi, γ — interferometrik koherensiya, $\Delta NDVI$ — NDVI qiymatining vaqt bo'yicha o'zgarishi, $\Delta NDMI$ — NDMI qiymatining o'zgarishi, S — relyef qiyaligi, H — balandlik.

Mazkur parametrlarning turli o'lchov birliklarida ifodalanishi ularni bevosita birlashtirishni qiyinlashtiradi. Shu sababli integral baholashdan oldin parametrlarni normallashtirish talab qilinadi. Normallashtirilgan parametrlar asosida umumiy xavf ko'rsatkichini shakllantirish mumkin:

$$R = \sum w_i X_i.$$

Bu yerda R — integral xavf ko'rsatkichi, X_i — tegishli normallashtirilgan parametr, w_i — parametrning vazn koeffitsiyenti. Mazkur modelni xavfli geologik jarayonlarning ehtimoliy zonalarini ajratishda metodik asos sifatida qo'llash mumkin. Bunda vazn koeffitsiyentlari tadqiqot hududining tabiiy sharoiti va mavjud kuzatuv ma'lumotlari asosida aniqlanishi kerak. Real monitoring tizimida ushbu koeffitsiyentlarni dala kuzatuvlari va mustaqil ma'lumotlar bilan tekshirish muhim ahamiyatga ega. Ko'p manbali ma'lumotlarni integratsiyalashning muhim jihati — turli sensorlardan olingan ma'lumotlarning fazoviy va vaqt bo'yicha mosligini ta'minlashdir. Masalan, SAR tasviri bir sanada, optik tasvir esa boshqa mavsumda olingan bo'lsa, ularning o'zgarishlarini to'g'ridan-to'g'ri taqqoslash noto'g'ri xulosalarga olib kelishi mumkin. Shu sababli ma'lumotlarni tanlashda kuzatuv sanasi, fazoviy aniqlik, bulutlilik darajasi, radar koherensiyasi va hududning mavsumiy xususiyatlari hisobga olinishi kerak. Xavfli geologik jarayonlarni aniqlashning taklif etilayotgan konseptual ketma-ketligini bir necha bosqichga ajratish mumkin. Dastlab tadqiqot hududi aniqlanadi va mavjud SAR hamda multispektral ma'lumotlar yig'iladi. Keyin SAR tasvirlari asosida interferometrik tahlil o'tkazilib, deformatsiya o'choqlari aniqlanadi. Keyingi bosqichda shu hududlarga mos optik tasvirlar tahlil qilinib, NDVI, NDMI va boshqa ko'rsatkichlar hisoblanadi. So'ngra raqamli relyef modeli va GIS ma'lumotlari bilan fazoviy integratsiya amalga oshiriladi. Yakuniy bosqichda aniqlangan belgilar birgalikda baholanib, batafsil geologik yoki geodezik tekshiruv talab qiladigan hududlar ajratiladi. Bunday yondashuvning muhim afzalligi monitoring jarayonini bosqichma-bosqich tashkil etish imkoniyatidir. Dastlab katta hudud masofadan zondlash ma'lumotlari yordamida skrining qilinadi. Keyinchalik faqat o'zgarishlar yoki deformatsiyalar aniqlangan hududlarda batafsil tekshiruvlar amalga oshiriladi. Natijada dala tadqiqotlari uchun sarflanadigan vaqt va resurslardan samaraliroq foydalanish mumkin. InSAR ma'lumotlarining multispektral optik ma'lumotlar bilan integratsiyasi nafaqat mavjud deformatsiyalarni aniqlash, balki ularning ehtimoliy sabablarini tushunishda ham yordam beradi. Masalan, deformatsiya qiyalikning ma'lum qismida kuzatilsa, ushbu hududning relyef xususiyatlari, vegetatsiya holati va namlik

dinamikasi bilan birgalikda tahlil qilinadi. Natijada deformatsiya o'chog'ining tabiiy sharoitlari haqida kengroq tasavvur hosil qilish mumkin. Bunda GNSS va boshqa geodezik o'lchovlar ham muhim nazorat manbasi bo'lib xizmat qiladi. InSAR katta hududni qamrab olgan fazoviy ma'lumotlarni taqdim etsa, GNSS alohida punktlarda yuqori aniqlikdagi koordinata o'zgarishlarini aniqlash imkonini beradi. Ushbu ikki turdagi ma'lumotni taqqoslash interferometrik natijalarning ishonchliligini baholash uchun foydali bo'lishi mumkin. Shuningdek, geologik xaritalar va dala kuzatuvlarini masofadan zondlash natijalari bilan birlashtirish zarur. Chunki geologik jarayonlarning rivojlanishi faqat Yer yuzasidagi ko'rinadigan o'zgarishlar bilan belgilanmaydi. Tog' jinslarining tarkibi, yoriqlar tizimi, gruntning fizik-mexanik xususiyatlari va gidrogeologik sharoitlar ham muhim rol o'ynaydi. Shu sababli sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari geologik tadqiqotlarning o'rnini to'liq bosuvchi vosita emas, balki ularni kengaytiruvchi va monitoring imkoniyatlarini kuchaytiruvchi texnologiya sifatida qaralishi kerak.

Sun'iy yo'ldosh ma'lumotlarining yana bir muhim jihati — vaqt qatorlarini shakllantirish imkoniyatidir. Bir martalik tasvir ma'lum bir vaqtdagi holatni ko'rsatadi, vaqt qatori esa jarayonning qanday rivojlanganini aniqlash imkonini beradi. Shu nuqtayi nazardan ko'p vaqtli InSAR va multispektral ma'lumotlarning parallel tahlili xavfli geologik jarayonlarning dinamikasini o'rganish uchun katta ilmiy imkoniyat yaratadi. Kelgusida ushbu ma'lumotlarni mashinali o'qitish algoritmlari bilan birlashtirish ham mumkin. Bunda deformatsiya, spektral indekslar, relyef va geologik parametrlar model uchun kirish xususiyatlari sifatida ishlatilishi mumkin. Klassifikatsiya algoritmlari yordamida xavfli va nisbatan barqaror hududlarni ajratish, klasterlash usullari yordamida esa o'xshash geodinamik xususiyatlarga ega zonalarini aniqlash mumkin. Biroq bunday modellarni qo'llash uchun yetarli hajmdagi ishonchli o'quv ma'lumotlari va mustaqil validatsiya to'plami talab etiladi. Umuman olganda, interferometrik SAR va multispektral optik ma'lumotlarning birgalikdagi qo'llanilishi xavfli geologik jarayonlarni monitoring qilishda ko'p manbali axborot tizimini shakllantirish imkonini beradi. Ushbu yondashuvda radar ma'lumotlari deformatsiyani, optik ma'lumotlar yer yuzasi holatini, raqamli relyef modeli esa geomorfologik sharoitni tavsiflaydi. GIS esa mazkur ma'lumotlarni yagona fazoviy muhitda birlashtirish vazifasini bajaradi. Natijada xavfli geologik jarayonlarni aniqlash faqat bitta ko'rsatkichga asoslanib qolmaydi. Deformatsiya, koherensiya, vegetatsiya, namlik, relyef va geologik sharoitlarning o'zaro mosligi hisobga olinadi. Bu esa monitoring natijalarini kompleks talqin qilish va ehtimoliy xavf zonalarini aniqlashning ilmiy asoslanganligini oshiradi.

XULOSA

Interferometrik sun'iy radar va multispektral optik ma'lumotlarning xavfli geologik jarayonlarni aniqlashdagi imkoniyatlarini tahlil qilish natijasida ushbu texnologiyalar zamonaviy monitoring tizimining muhim tarkibiy qismlari bo'lishi mumkinligi aniqlandi. InSAR texnologiyasi Yer yuzasi deformatsiyalarini katta hududlarda aniqlash va ularning vaqt bo'yicha o'zgarishini kuzatish imkonini beradi. Multispektral optik ma'lumotlar esa yer qoplami, vegetatsiya va namlikdagi o'zgarishlarni baholash orqali deformatsiya jarayonlari haqida qo'shimcha axborot beradi. Tadqiqot davomida radar va optik ma'lumotlarning imkoniyatlari bir-birini to'ldirishi asoslandi. InSAR orqali aniqlangan deformatsiya o'choqlarini multispektral tasvirlar, raqamli relyef modeli va GIS ma'lumotlari bilan taqqoslash xavfli hududlarni yanada to'liq tavsiflash imkonini beradi. NDVI va NDMI kabi spektral indekslardan foydalanish yer yuzasidagi vegetatsiya va namlik o'zgarishlarini aniqlashga yordam beradi. Shu bilan birga, ushbu ko'rsatkichlarning o'zgarishi boshqa tabiiy va antropogen omillar bilan ham bog'liq bo'lishi mumkinligi sababli ularni InSAR va geologik ma'lumotlar bilan kompleks tahlil qilish zarur. Ko'p manbali ma'lumotlarni integratsiyalash asosida deformatsiya, koherensiya, spektral indekslar va relyef parametrlarini yagona baholash tizimiga birlashtirish mumkin. Bunday yondashuv xavfli geologik jarayonlarni dastlabki bosqichda aniqlash, monitoring hududlarini ustuvorlashtirish va dala tadqiqotlarini samarali tashkil etish uchun metodik asos bo'lib xizmat qiladi. Shu bilan birga, masofadan zondlash ma'lumotlari dala va geodezik kuzatuvlarni to'liq almashtirmaydi. Aksincha, ularni keng hududli va takroriy monitoring vositasi sifatida qo'llash, aniqlangan xavfli zonalarini GNSS, geologik kuzatuvlar va boshqa mustaqil ma'lumotlar yordamida tekshirish maqsadga muvofiq. Kelgusida real hududlarning ko'p vaqtli Sentinel-1 va Sentinel-2 ma'lumotlari, GNSS kuzatuvlari, raqamli relyef modellari va geologik ma'lumotlarini yagona geoaxborot tizimida birlashtirish orqali xavfli geologik jarayonlarni avtomatlashtirilgan aniqlash va monitoring qilish metodikasini takomillashtirish mumkin. Bu esa geologik xavflarni baholashning tezkorligi, aniqligi va amaliy samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

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.