

Abdukurimov M.M.*Alfraganus universiteti, Turizm fakulteti,**Umumkasbiy fanlar kafedrası**katta o'qituvchisi**e-mail: makhsudabdukarimov774@gmail.com**<https://orcid.org/0009-0001-4313-1559>*

GNSS VA RADIOLOKATSION INTERFEROMETRIYA (InSAR) USULLARINI INTEGRATSIYALASH ASOSIDA TUPROQLI TO'G'ONLAR DEFORMATSIYASINI KOMPLEKS MONITORING QILISH (TO'POLON TO'G'ONI MISOLIDA)

Annotatsiya. Gidrotexnika inshootlari deformatsiyasini kuzatishda qo'llanilayotgan sun'iy yo'ldosh navigatsiya tizimlari (GNSS) va radiolokatsion interferometriya (InSAR) usullarining har biri o'ziga xos fazoviy va vaqtiy cheklavlarga ega: GNSS uzluksiz, ammo nuqtaviy ma'lumot beradi; InSAR keng hududni retrospektiv qamrab oladi, biroq deformatsiyani faqat yo'ldoshning ko'rish chizig'i (LOS) bo'yicha bir o'lchamli proyeksiyada qayd etadi. Mazkur maqolada ikki usulni yagona metodologik doirada birlashtirishning uch bosqichli sxemasi — fazoviy moslashtirish, GNSS siljish vektorini ko'rish chizig'iga proyeksiyalash va qoldiq deformatsiyani baholash — asoslab berilgan hamda u To'polon tuproqli to'g'oni (Surxondaryo viloyati) misolida sinovdan o'tkazilgan. To'g'onda 2024-yildan buyon ishlab turgan o'nta stansiyali ko'p tizimli GNSS tarmog'i gorizont bo'yicha ± 2 mm, vertikal bo'yicha ± 4 mm aniqlikni ta'minlaydi; Sentinel-1 ma'lumotlari asosida 2020–2024-yillar uchun bajarilgan PS-InSAR (6 233 nuqta) va SBAS (18 391 nuqta) tahlillari esa to'g'on va suv ombori hududini to'liq qamrab olgan. Ikkala texnologiya ham deformatsiyaning quyi b'ef tomon yo'nalganligini bir-biridan mustaqil ravishda tasdiqlaydi: GNSS bo'yicha gorizont siljish azimuti $170\text{--}190^\circ$, InSAR bo'yicha esa maksimal cho'kish aynan quyi b'ef zonasida qayd etilgan. Shu bilan birga, ikki usul to'g'onning turli qismlarini qamrab olishi aniqlandi — GNSS asosan toj zonasini, InSAR esa bermalar va yuklanmagan qiyalikni. Bu holat ularning o'zaro almashinuvchi emas, balki o'zaro to'ldiruvchi ekanligini ko'rsatadi va kompleks monitoring tizimini shakllantirish zaruratini asoslaydi.

Kalit so'zlar: GNSS; InSAR; PS-InSAR; SBAS; integratsiyalashgan monitoring; deformatsiya; tuproqli to'g'on; ko'rish chizig'i; To'polon to'g'oni.

Kirish. To'g'onlar xavfsizligini nazorat qilish gidrotexnika qurilishi amaliyotining asosiy talablaridan biri

bo'lib, inshootning yoshi, balandligi va suv sig'imi ortishi bilan uning ahamiyati oshib boradi [1]. Klassik geodezik

usullar — triangulyatsiya, trilateratsiya, poligonometriya va aniq nivelirlash — millimetr darajasidagi aniqlikni ta'minlay olsa-da, ular davriy kuzatuv kampaniyalariga asoslangani sababli deformatsiya jarayonining uzluksiz dinamikasini to'liq aks ettira olmaydi [2].

So'nggi yigirma yil ichida bu cheklovni bartaraf etishga qaratilgan ikkita texnologiya keng tarqaldi. Birinchisi — sun'iy yo'ldosh navigatsiya tizimlari (GNSS): ko'p tizimli qabul qilgichlar uch o'lchamli koordinatalarni uzluksiz, avtomatlashtirilgan tarzda va millimetr aniqligida qayd etadi [3]. Ikkinchisi — radiolokatsion interferometriya (InSAR): bir hududning turli vaqtlarda olingan radiolokatsion tasvirlari orasidagi faza farqini tahlil qilish orqali sirtning millimetr darajasidagi siljishini masofadan, keng hudud bo'ylab va retrospektiv aniqlash imkonini beradi [4; 5].

Biroq amaliyotda bu ikki texnologiya ko'pincha bir-biridan mustaqil ravishda, alohida hisobotlar doirasida qo'llaniladi. Natijada ularning bir-birini to'ldiruvchi imkoniyatlaridan to'liq foydalanilmaydi. Aslida GNSS va InSAR fazoviy hamda vaqtiy o'lchov bo'yicha bir-biriga qarama-qarshi xususiyatlarga ega: GNSS vaqt bo'yicha zich, ammo fazo bo'yicha o'ta siyrak; InSAR esa aksincha — fazo bo'yicha zich, vaqt bo'yicha diskret. Bundan tashqari, GNSS siljishning uchta mustaqil tashkil etuvchisini beradi, InSAR esa ularning yagona proyeksiyasini o'lchaydi, ya'ni GNSS ma'lumotlari InSAR natijalarini tarkibiy qismlarga ajratishda mustaqil cheklov

(constraint) vazifasini bajarishi mumkin [4].

Mazkur maqolaning maqsadi ikki qismdan iborat. Birinchidan, GNSS va InSAR ma'lumotlarini yagona metodologik doirada solishtirish va integratsiyalashning bosqichma-bosqich sxemasini asoslash. Ikkinchidan, ushbu sxemani To'polon tuproqli to'g'oni misolida qo'llash, ikki usul natijalarining o'zaro muvofiqligini va ularning fazoviy qamrovidagi farqlarni baholash.

Materiallar va usullar. 2.1. Ikki usulning o'lchash geometriyasidagi tub farqi. GNSS monitoringida har bir kuzatuv nuqtasi uchun boshlang'ich (nol) siklda aniqlangan koordinatalar (X_0, Y_0, Z_0) tayanch sifatida qabul qilinadi va keyingi har bir siklning koordinatalari (X_t, Y_t, Z_t) ulardan avtomatik ravishda ayiriladi:

$$\Delta X = X_t - X_0; \Delta Y = Y_t - Y_0; \Delta Z = Z_t - Z_0 \quad (1)$$

bu yerda $\Delta Z < 0$ cho'kishni, $\Delta Z > 0$ esa ko'tarilishni bildiradi. Gorizont siljishning to'liq qiymati gorizont tashkil etuvchilarning Evklid normasi sifatida hisoblanadi:

$$d_{\text{hor}} = \Delta L = \sqrt{(\Delta X^2 + \Delta Y^2)} \quad (2)$$

uning shimolga nisbatan azimuti esa kvadrantni to'g'ri aniqlashni kafolatlovchi ikki argumentli arktangens funksiyasi orqali topiladi:

$$\alpha = \text{atan2}(\Delta Y, \Delta X) \quad (3)$$

InSAR usulida esa ikkita radiolokatsion tasvir orasidagi kuzatilgan faza

farqi bir necha tashkil etuvchidan iborat bo'ladi [6]:

$$\varphi_{\text{obs}} = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{orb}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (4)$$

bu yerda φ_{topo} — relyefga bog'liq topografik faza; φ_{def} — haqiqiy deformatsiya fazasi; φ_{atm} — troposfera va ionosferadagi kechikishdan yuzaga keladigan atmosfera fazasi; φ_{orb} — orbital xatolik; φ_{noise} — shovqin tashkil etuvchisi. Ajratib olingan φ_{def} faqat yo'ldoshning ko'rish chizig'i bo'ylab siljishni beradi va uning uch o'lchamli tashkil etuvchilar bilan bog'liqligi quyidagicha ifodalanadi [4]:

$$d_{\text{LOS}} = d_{\text{E}} \cdot \sin\theta \cdot \sin\alpha - d_{\text{N}} \cdot \sin\theta \cdot \cos\alpha + d_{\text{U}} \cdot \cos\theta \quad (5)$$

bu yerda d_{E} , d_{N} , d_{U} — mos ravishda sharqiy, shimoliy va vertikal tashkil etuvchilar; θ — radiolokatorning tushish burchagi; α — yo'ldosh orbitasi-ning azimuti.

(1)–(3) va (5) tenglamalarni qiyoslash integratsiyaning asosiy metodologik xulosasini beradi: GNSS uchta mustaqil o'lchov beradi, InSAR esa ularning bitta chiziqli kombi-natsiyasini o'lchaydi. Demak, ma'lumotlarni birlashtirish assimetrik xarakterga ega — GNSS natijalari (5) tenglama orqali InSAR o'lchoviga aynan keltirilishi mumkin, teskarisi esa qo'shimcha faraz yoki ikkinchi orbital yo'nalish bo'yicha tasvirlarsiz mumkin emas.

2.2. Fazoviy va vaqtiy o'lchamlarning qiyosiy tavsifi. Ikki texnologiya-ning monitoring nuqtai nazaridan asosiy xususiyatlari 1-jadvalda umumlashtirilgan. Jadval ko'rsatishicha, ular bir xil vazifani bajaruvchi muqobil vositalar emas, balki turli o'lchov o'qlari bo'ylab ishlovchi to'ldiruvchi vositalardir.

Mezon	GNSS	InSAR (PS-InSAR / SBAS)
O'lchov turi	Uch o'lchamli mutlaq koordinata	Ko'rish chizig'i bo'yicha bir o'lchamli proyeksiya
Fazoviy zichlik	Siyrak (o'nlab stansiya)	Zich (minglab nuqta)
Vaqtiy diskretlik	Uzluksiz, 24/7	Yo'ldosh qaytish davriga bog'liq
Retrospektivlik	Faqat o'rnatilgan paytdan boshlab	Arxiv tasvirlar hisobiga o'tmishga qaratilgan
Vertikal aniqlik	± 4 mm	$\approx 1-3$ mm (PS) / $\approx 5-10$ mm (SBAS)
Gorizontal aniqlik	± 2 mm	Orbita yo'nalishiga bog'liq, bilvosita
Asosiy cheklov	Nuqtalar soni va joylashuvi	Barqaror qaytaruvchi nuqtalar zichligi

Mezon	GNSS	InSAR (PS-InSAR / SBAS)
Qamrab oladigan zona	Toj va bermalardagi tanlangan nuqtalar	To'g'on, bermalar, qirg'oqlar, suv ombori atrofi

1-jadval. GNSS va InSAR texnologiyalarining monitoring imkoniyatlari bo'yicha qiyosiy tavsifi [2; 4; 7; 8].

2.3. Integratsiyalash sxemasi.

Ikki manba ma'lumotlarini birlashtirish uchun quyidagi uch bosqichli tartib taklif etiladi.

Birinchi bosqich — fazoviy moslashtirish. Har bir GNSS stansiyasi atrofida r radiusli bufer zona ajratiladi va shu zonaga tushgan barqaror qaytaruvchi (PS) yoki SBAS nuqtalarining deformatsiya qiymatlari tanlab olinadi. Buferning o'lchami inshoot elementining o'lchamidan kichik, ammo statistik ishonchli tanlanma hosil qiladigan darajada katta bo'lishi kerak.

Ikkinchi bosqich — geometrik keltirish. GNSS bo'yicha aniqlangan uch o'lchamli siljish vektori (5) tenglama yordamida yo'ldoshning ko'rish chizig'iga proyeksiyalanadi:

$$d_{LOS}^{GNSS} = \Delta Y \cdot \sin\theta \cdot \sin\alpha - \Delta X \cdot \sin\theta \cdot \cos\alpha + \Delta Z \cdot \cos\theta \quad (6)$$

bunda ΔX , ΔY , ΔZ (1) tenglamadan olinadi. Bu amal ikki manbani bir xil o'lchov o'qiga keltiradi va ularni bevosita solishtirish imkonini beradi.

Uchinchi bosqich — qoldiqni baholash. Bir xil o'qqa keltirilgan qiymatlar farqi hisoblanadi:

$$\Delta_{res} = d_{LOS}^{InSAR} - d_{LOS}^{GNSS} \quad (7)$$

Agar $|\Delta_{res}|$ ikki usulning birlashtirilgan o'rtacha kvadratik xatoligidan

oshmasa, natijalar o'zaro muvofiq deb qabul qilinadi; oshgan taqdirda esa farqning manbai (turli tayanch tizim, turli kuzatuv davri, PS nuqtalarining yetishmasligi yoki haqiqiy lokal deformatsiya) alohida tahlil qilinadi.

2.4. Tadqiqot ob'ekti va ma'lumotlar bazasi. Tadqiqot ob'ekti sifatida Surxondaryo viloyatidagi To'polon tuproqli to'g'oni tanlangan. To'g'onda ikkala texnologiya ham amalda joriy etilgan bo'lib, bu ularni bir xil inshoot uchun qiyoslash imkonini beradi.

GNSS qismi. Onlayn monitoring tizimini loyihalash 2019-yil avgust oyida "To'polon GES" AJ buyurtmasi asosida boshlangan; 2024-yil fevral oyida "Gidrotexmonitoring" MChJ mutaxassislari CHC Navigation kompaniyasi bilan hamkorlikda iStar rusumli doimiy GNSS qabul qilgichlarini o'rnatib, HCmonitor dasturiy platformasini sozlagan va tizimni to'liq ishga tushirgan [9; 10]. Jami o'nta stansiya joylashtirilgan: to'rttasi (GNSS-1–GNSS-4) to'g'on tojida (965 m belgi), uchitasi (GNSS-5–GNSS-7) 919 m bermada, ikkitasi (GNSS-8, GNSS-9) 875 m bermada va bitta baza stansiyasi (GNSS-10) deformatsiya zonasidan 500 m dan ortiq masofada, barqaror tog' jinsi asosida. Tizim statik rejimda gorizontaal bo'yicha ± 2 mm, vertikal bo'yicha ± 4

mm aniqlikni ta'minlaydi va GPS, GLONASS, BeiDou hamda Galileo tizimlaridan birgalikda foydalanadi.

InSAR qismi. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-maydagi PQ-158-sonli Qarori ijrosini ta'minlash doirasida To'polon suv ombori to'g'oni zilzilabardoshligini radiolokatsion kosmik suratlarni interferometrik qayta ishlash asosida baholash bo'yicha ilmiy-amaliy tadqiqot bajarilgan [11; 12]. 2020-yil yanvaridan 2024-yil iyuniga qadar olingan Sentinel-1 C-diapazon ($\lambda = 5,5$ sm) radiolokatsion ma'lumotlari PS-InSAR va SBAS usullarida qayta ishlangan. PS-InSAR tahlili suv ombori va to'g'on hududi bo'ylab 6 233 ta tayanch nuqtani, to'g'onning o'zi bo'yicha esa 250 ta nazorat nuqtasini qamrab olgan; SBAS tahlili 18 391 ta nuqtani, shundan 256 tasini to'g'onning o'zida qamragan. To'polon hududi uchun tushish burchagi θ odatda $31\text{--}47^\circ$ oralig'ida bo'lib [13], (5) tenglamaga ko'ra vertikal tashkil etuvchining ko'rish chizig'iga qo'shgan hissasi $\cos\theta \approx 0,66\text{--}0,86$ ni tashkil etadi.

Natijalar. 3.1. GNSS kuzatuvlari natijalari. To'g'on toji zonasidagi barcha stansiyalar bo'yicha (3) tenglama asosida hisoblangan gorizonta siljish azimuti $\alpha \approx 170\text{--}190^\circ$ ni tashkil etadi, ya'ni siljish quyi b'ef tomon yo'nalgan. Bir-biridan mustaqil stansiyalarda yo'nalishning bir xilligi deformatsiyaning asosiy harakatlantiruvchi omili suv omboridan keladigan gidrostatik bosim ekanligini ko'rsatadi. Eng katta qiymat to'g'on tojida

joylashgan GNSS-3 stansiyasida qayd etilgan: to'plangan gorizonta siljish 28 mm ga yetgan, bu Xalqaro yirik to'g'onlar komissiyasi (ICOLD) ushbu sinf inshootlari uchun tavsiya etadigan 30 mm chegaraviy qiymatdan atigi 2 mm past [1].

3.2. InSAR tahlili natijalari. PS-InSAR usuli bo'yicha suv ombori va to'g'on hududining to'liq tahlili (6 233 nuqta) quyi b'ef tomonida maksimal cho'kish $-214,74$ mm, suv omborining chap qirg'og'ida esa maksimal ko'tarilish $+54,54$ mm ekanligini aniqlagan; barcha nuqtalar bo'yicha o'rtacha yillik deformatsiya tezligi $-0,68$ mm/yil. To'g'onning o'zi bo'yicha bajarilgan tahlil (250 nuqta) quyi b'ef bermalarida 35 mm dan 210 mm gacha cho'kishni qayd etgan; kuzatuv davri mobaynida to'g'onning umumiy deformatsiyasi $-38,55$ mm ni, o'rtacha yillik cho'kish esa $-8,69$ mm/yil ni tashkil etgan [12].

SBAS usuli bo'yicha o'sha tarmoq (18 391 nuqta) tahlili quyi b'efda maksimal cho'kish $-113,91$ mm va o'ng qirg'oqda maksimal ko'tarilish $+41,38$ mm ni ko'rsatgan, o'rtacha yillik tezlik $-0,40$ mm/yil. Gorizonta bo'yicha maksimal sharqqa siljish $+137,31$ mm bo'lib, u aynan to'g'onning yuklanmagan quyi b'ef qiyaligiga to'g'ri keladi va o'rtacha yillik 30,94 mm/yil tezlikka mos keladi — bu qiymat alohida e'tibor talab qiladigan zona sifatida ajratilgan [12].

3.3. Ikki usul natijalarining qiyosiy tahlili. 2-jadvalda ikki texnologiya bilan olingan asosiy ko'rsatkichlar

solishtirilgan. Solishtirish ikki muhim natijani beradi.

Ko'rsatkich	GNSS (2024-y.dan)	InSAR (2020–2024-y.)	Talqin
Deformatsiya yo'nalishi	Azimut 170–190° (quyi b'ef)	Maksimal cho'kish quyi b'efda	Ikki usul mustaqil ravishda bir xil yo'nalishni tasdiqlaydi
Asosiy qamrov zonasi	To'g'on toji (965 m)	Bermalar, qiyalik, qirg'oqlar	Qamrov zonalarini bir-birini to'ldiradi
Eng katta gorizontall qiymat	28 mm (GNSS-3)	+137,31 mm (yuklanmagan qiyalik)	Turli zonalar, bevosita solishtirib bo'lmaydi
Vertikal tezlik	Uzluksiz qayd etiladi	–8,69 mm/yil (to'g'on, PSI)	InSAR uzoq davrli trendni beradi
Kuzatuv davri	Uzluksiz, real vaqt	Retrospektiv, arxivga asoslangan	Vaqt o'qi bo'yicha to'ldiruvchilik

2-jadval. To'polon to'g'onida GNSS va InSAR usullari bilan olingan natijalarning qiyosiy tahlili [9–12].

Birinchidan, deformatsiyaning yo'nalishi bo'yicha ikki usul bir-birini mustaqil ravishda tasdiqlaydi: GNSS azimuti quyi b'efni ko'rsatadi va InSAR maksimal cho'kish zonasi ham aynan shu tomonda joylashgan. Bu muvofiqlik natijalarning asboblar xatoligi emas, balki haqiqiy fizik jarayon ekanligini kuchaytiradi.

Ikkinchidan, ikki usul to'g'onning turli qismlarini qamrab olgan. GNSS stansiyalarining aksariyati toj va yuqori bermalarda joylashgan bo'lsa, InSAR bo'yicha eng katta faollik quyi b'efning yuklanmagan qiyaligida aniqlangan — ya'ni GNSS tarmog'i zich qamramagan hududda. Shu sababli 28 mm va 137,31 mm qiymatlarini bevosita

solishtirish metodologik jihatdan noto'g'ri bo'ladi: ular turli nuqtalarga, turli davrlarga va turli o'lchov geometriyasiga tegishli. Aynan shu holat (7) tenglamaga asoslangan qoldiq tahlilini o'tkazish uchun umumiy nuqtalar zarurligini ko'rsatadi.

Muhokama. Olingan natijalar integratsiyalashgan yondashuvning bir necha afzalligini ko'rsatadi. Avvalo, InSAR to'g'onning GNSS tarmog'i qamramagan zonalarida deformatsiya o'chog'ini aniqlashi mumkin: To'polon misolida yuklanmagan quyi b'ef qiyaligida qayd etilgan 30,94 mm/yil tezlik shunday o'choqdir. Ushbu natija GNSS tarmog'ini kengaytirish yoki qo'shimcha nazorat nuqtalarini aynan

shu zonaga joylashtirish uchun asos bo'lib xizmat qiladi. Teskari yo'nalishda esa GNSS ma'lumotlari (6) tenglama orqali InSAR uchun mustaqil tayanch va nazorat vazifasini bajaradi: InSAR faqat bir o'lchamli proyeksiyani o'lchagani sababli, uning natijalarini vertikal va gorizontal tashkil etuvchilarga ajratish uchun tashqi cheklov talab etiladi va GNSS bunday cheklovni ta'minlaydi [4].

Xalqaro tajriba ham shunday kompleks yondashuvni qo'llab-quvvatlaydi. Gruziyadagi Enguri gum-bazzimon to'g'onida DAMAST loyihasi doirasida 2020-yildan buyon o'nta doimiy GNSS stansiyasi ishlatilib, toj siljishi 8 sm gacha qayd etilgan va suv ombori to'lish hamda bo'shatish davrlarida deformatsiya yo'lining farqlanishi — gisterezis effekti — aniqlangan [14]. Meksikadagi Sanalona to'g'onida suv sathi va siljish o'rtasidagi korrelyatsiya koeffitsienti $r = 0,97$ ni tashkil etgan [15]. Xitoydagi suv ombori to'g'onida ko'p tizimli GNSS ishlov berish faqat GPS asosidagi yechimga nisbatan aniqlikni 35 % ga oshirgani ko'rsatilgan [16]. InSAR yo'nalishida esa Xitoydagi to'g'on bo'yicha uzoq muddatli tahlil klassik geodezik o'lchovlar bilan $r \approx 0,93$ korrelyatsiyani bergan [17]. Bu natijalar To'polon bo'yicha olingan xulosalarning fizik jihatdan asoslanganligini tasdiqlaydi.

Shu bilan birga, integratsiyalashda bir qator cheklovlarni hisobga olish zarur. Birinchidan, ikki tizimning kuzatuv davrlari to'liq mos kelmaydi: InSAR tahlili 2020–2024-yillarni, GNSS

tarmog'i esa 2024-yildan keyingi davrni qamraydi. To'liq qiymatli qoldiq tahlili uchun ikkala tizimning kesishgan davri bo'yicha ma'lumotlar to'planishi kerak. Ikkinchidan, PS-InSAR barqaror qaytaruvchi nuqtalarga tayangani sababli o'simlik qoplamli va bo'shoq gruntli hududlarda samaradorligi pasayadi; ochiq bermalar va suv ombori qirg'oqlari uchun SBAS afzalroq [7]. Uchinchidan, PS-InSAR va SBAS natijalarini nuqtama-nuqta solishtirish metodologik jihatdan cheklangan, chunki ular turli algoritmlar va turli tayanch tarmoqlarga asoslanadi [8; 18]. To'rtinchidan, GNSS uchun troposfera tuzatmasining aniqligi to'g'on toji va quyi bermalar orasidagi sezilarli balandlik farqiga (≈ 90 m) sezgir bo'lib, mahalliy meteorologik ma'lumotlar bilan tekshirib borish tavsiya etiladi.

Umuman olganda, GNSS va InSAR o'rtasidagi tanlov masalasini qo'yish metodologik jihatdan noto'g'ri: ular bir-birini almashtirmaydi. Shuningdek, ikkalasi ham klassik geodezik usullarni — triangulyatsiya, trilateratsiya va aniq nivelirlashni — o'rnini bosmaydi, balki ular bilan birgalikda ko'p bosqichli monitoring tizimini tashkil etadi [2; 3].

Xulosa. Maqolada GNSS va InSAR ma'lumotlarini yagona metodologik doirada integratsiyalashning uch bosqichli sxemasi — fazoviy moslashtirish, GNSS vektorini ko'rish chizig'iga proyeksiyalash va qoldiq deformatsiyani baholash — asoslab berildi hamda To'polon tuproqli to'g'oni misolida qo'llanildi.

Tahlil natijalari quyidagilarni ko'rsatdi. Birinchidan, ikkala texnologiya ham deformatsiyaning quyi b'ef tomon yo'nalganligini bir-biridan mustaqil ravishda tasdiqlaydi, bu esa gidrostatik yuklanishning asosiy omil ekanligini kuchaytiradi. Ikkinchidan, ular to'g'oning turli zonalarini qamrab oladi: GNSS toj zonasida 28 mm gacha to'plangan gorizontaal siljishni qayd etgan bo'lsa, InSAR yuklanmagan quyi b'ef qiyaligida 30,94 mm/yil tezlikdagi faol zonani aniqlagan. Uchinchidan, ikki usul o'lchov geometriyasi jihatidan

assimetrik bo'lib, GNSS InSAR uchun mustaqil cheklov beradi, InSAR esa GNSS tarmog'ini optimal joylashtirish uchun fazoviy asos yaratadi.

Shu asosda To'polon to'g'oni uchun quyidagilar tavsiya etiladi: ikkala tizimning kesishgan kuzatuv davri bo'yicha (7) tenglamaga asoslangan qoldiq tahlilini muntazam bajarish; InSAR aniqlagan faol zonaga qo'shimcha GNSS nuqtalarini joylashtirish; hamda ikki tizimni yagona tayanch koordinata asosiga keltirish.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

- [1] ICOLD. Dam Safety Guidelines. International Commission on Large Dams. — Paris: ICOLD, 2022.
- [2] Scaioni M., Marsella M., Crosetto M., Tornatore V., Wang J. Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring // *Sensors*. — 2018. — Vol. 18, №11. — P. 3682.
- [3] Chen M., Zhang H. GNSS-based deformation monitoring methodology for hydraulic structures // *Journal of Geodesy*. — 2018. — Vol. 92, №4. — P. 341–358.
- [4] Massonnet D., Feigl K.L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface // *Reviews of Geophysics*. — 1998. — Vol. 36, №4. — P. 441–500.
- [5] Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R. Synthetic aperture radar interferometry // *Proceedings of the IEEE*. — 2000. — Vol. 88, №3. — P. 333–382.
- [6] Hanssen R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. — 308 p.
- [7] Ashrafzadeh A., Karimzadeh S. Advanced InSAR analysis for dam surface monitoring // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. — 2021. — Vol. 80, №6. — P. 4535–4552.
- [8] Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2001. — Vol. 39, №1. — P. 8–20.
- [9] CHC Navigation iStar GNSS qabul qilgich texnik ko'rsatkichlari. — URL: <https://www.chcnave.com/product-detail/istar> (murojaat sanasi: 15.03.2025).

- [10] HCmonitor GNSS monitoring dasturiy ta'minoti. CHC Navigation (Chcnav) kompaniyasi. — URL: <https://www.chcnv.com> (murojaat sanasi: 20.01.2025).
- [11] O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 16-maydagi PQ-158-sonli Qarori "To'polon suv ombori to'g'oni zilzilabardoshligini radiolokatsion kosmik suratlarni interferometrik qayta ishlash va natijalarni tahlil qilish asosida baholash to'g'risida". — Toshkent, 2023.
- [12] Texnik-analitik hisobot: To'polon suv omborida amalga oshirilgan ishlar yuzasidan. — Toshkent: "Gidrotexmonitoring" MChJ, 2024.
- [13] Sentinel-1 Mission Guide. European Space Agency. — URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> (murojaat sanasi: 05.04.2025).
- [14] DAMAST Consortium. Remote Sensing and Geodetic Monitoring of the Enguri High Arch Dam, Georgia // Remote Sensing. — 2020. — Vol. 12, №24. — P. 4006.
- [15] Vazquez-Ontiveros J.R., Hernandez-Andrade D. GNSS monitoring of the Sana-lona earthfill dam: correlation of displacement and water level // Journal of Surveying Engineering. — 2021. — Vol. 147, №1. — 04020022.
- [16] Xiao R., Yu C., He X. Multi-GNSS Monitoring of Reservoir Dam Deformation // Remote Sensing. — 2022. — Vol. 14, №2. — 284 p.
- [17] Guo Y., Tong L. Geodetic monitoring of Xiaolangdi dam using PS-InSAR and levelling methods // Engineering Geology. — 2019. — Vol. 257. — P. 105–117.
- [18] Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2002. — Vol. 40, №11. — P. 2375–2383.
- [19] ShNK 2.02.02-20. Gidrotexnika inshootlari. Asosiy loyiha qoidalari. O'zbekiston Respublikasi Qurilish vazirligi. — Toshkent, 2020.
- [20] Xujaev, M. (2020). Mahmudkhuja Behbudiy as a leader of jadid reforms. The Light of Islam, 3, 39-47.
- [21] Evlen, H., Juraev, D., Ziyamukhamedova, U., Khujaev, M., & Jalilov, F. (2025). PLA/Ti6Al4V composite scaffolds for bone tissue engineering: mechanical and thermal properties via FDM and bioprinting. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition, 1-25.
- [22] Abduraimova, N., Sharopova, N., Khujaev, M., Sapayev, V., Fattoyeva, O., & Yusufov, S. (2025). Economic development through analysis of the education and entrepreneurship impacts. Economic Annals-XXI/Ekonomičnij Časopis-XXI, 214(3/4), 84.
- [23] Isoxonovich, M. X. (2022). Middle Ages Movarounnahr Rulers in the Views OF Researchers. European Journal of Innovation in Nonformal Education, 2(6), 134-136.

[24] Xujayev, M. I. (2018). THE COVERAGE OF THE PROBLEM OF NATIONALITY AND ITS ROLE ON THE PRESENT DAY IN AHMAD ZAKI VALADI'S WORK. Мировая наука, (6 (15)), 61-63.

[25] Хужаев, М. И. (2018). АХМАД ЗАКИ ВАЛИДИЙНИНГ ДИНИЙ-ФАЛСАФИЙ МЕРОСИНИНГ ИЛДИЗЛАРИ. In Инновационные подходы в современной науке (pp. 177-182).

[26] Khujaev, M. (2024). AHMED ZAKI: ON THE IDEAS OF THE PHILOSOPHY OF HISTORY. Экономика и социум, (1 (116)), 235-239.