UO‘K: 528.8:622.1

10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.33

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

KON HUDUDLARIDA YER YUZASI DEFORMATSIYALARINI InSAR USULLARI BILAN MONITORING QILISHNING QIYOSIY TAHLILI



Botirov Shoxbos Soibjon o‘g‘li

Katta o‘qituvchi, Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti, Termiz, O‘zbekiston
E-mail: shoxbos.b@mail.ru
ORCID ID: 0009-0002-3045-4217
Science ID: MFR-0925-0068



Nomdorov Rustam Uralovich

Dotsent, texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), Qarshi davlat texnika universiteti, “Geologiya va konchilik ishi” kafedrasi, Qarshi, O‘zbekiston
E-mail: rustamnomdorov@mail.ru
ORCID ID: 0009-0000-6987-8995
Science ID: FQD-0425-0028

Annotatsiya. *Kon hududlarida yer yuzasi deformatsiyalarini aniqlash va talqin qilishda interferometrik sintetik aperturali radar usullarining imkoniyatlari qiyosiy baholandi. Tadqiqot taqdim etilgan oltita tasvir, beshta amaliy misol guruhi va tekshirilgan ilmiy adabiyotlar tahliliga asoslandi. Berezniki kaliy tuzi koni va Lost Hills neft koni asosiy texnogen obyektlar sifatida, Bam zilzilasi, Rim shahar muhiti hamda Alyaska vulqonlari esa metodik qiyoslash uchun o‘rganildi. D-InSAR, doimiy sochuvchi nuqtalar interferometriyasi va kichik bazisli interferogrammalar vaqt qatorlari kuzatuv geometriyasi, kogerentlik, vaqt bo‘yicha qamrov va tekshirish talablari asosida solishtirildi. Faza–siljish bog‘lanishi va gorizontal harakatni e’tiborsiz qoldirish ta’siri bo‘yicha qayta hisoblanadigan analitik diagrammalar tuzildi. Shartli 56,6 va 236 mm to‘lqin uzunliklari uchun bir to‘liq faza sikli mos ravishda 28,3 va 118 mm radar yo‘nalishidagi siljishga tengligi hisoblandi. Qarash yo‘nalishidagi 5 mm gorizontal siljish vertikal harakat sifatida talqin qilinganda, 35° tushish burchagida 3,50 mm sistematik og‘ish yuzaga kelishi ko‘rsatildi. Tasvirlarni tekshirish ayrim sarlavhalar va obyekt nomlari orasida nomuvofiqlik mavjudligini aniqladi. Natijalar kon monitoringida radar yo‘nalishidagi siljishni vertikal cho‘kishdan ajratish, atmosfera va kogerentlik ta’sirini baholash hamda InSAR kuzatuvlarini GNSS va nivelirlash bilan tekshirish zarurligini asoslaydi. Hisobiy diagrammalar yangi dala o‘lchovlari yoki kon uchun tayyor xavf chegaralari sifatida talqin qilinmaydi.*

Kalit so‘zlar: *InSAR, kon hududi, yer yuzasi deformatsiyasi, cho‘kish, D-InSAR, doimiy sochuvchi nuqtalar, SBAS, kogerentlik, kuzatuv geometriyasi, geodezik monitoring.*

Received: 20.09.2026 | Accepted: 10.10.2026 | Issue publication: 10.10.2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ МЕТОДАМИ InSAR

Ботиров Шохбос Соибжон угли

Старший преподаватель, Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий, Термез, Узбекистан

Номдоров Рустам Уралович

Доцент, доктор философии (PhD) по техническим наукам, кафедра «Геология и горное дело», Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

Аннотация. *Проведена сравнительная оценка возможностей интерферометрической радиолокации с синтезированной апертурой для выявления и интерпретации деформаций земной поверхности на горнопромышленных территориях. Исследование основано на анализе шести предоставленных изображений, пяти групп практических примеров и проверенной научной литературы. Калийный рудник в Березниках и нефтяное месторождение Lost Hills рассмотрены как основные техногенные объекты; землетрясение в Баме, городская среда Рима и вулканы Аляски использованы для методического сопоставления. D-InSAR, интерферометрия постоянных рассеивателей и временные ряды малобазисных интерферограмм сопоставлены по геометрии наблюдений, когерентности, временному охвату и требованиям к верификации. Построены воспроизводимые аналитические диаграммы зависимости смещения от фазы и влияния неучтённого горизонтального движения. Для условных длин волн 56,6 и 236 мм полный фазовый цикл соответствует смещениям вдоль линии визирования 28,3 и 118 мм соответственно. Показано, что при угле падения 35° неучтённое горизонтальное смещение 5 мм в направлении горизонтальной проекции линии визирования вызывает систематическое отклонение оценки вертикального движения на 3,50 мм. Проверка изображений выявила несоответствия отдельных подписей и названий объектов. Результаты обосновывают необходимость разграничения смещения вдоль линии визирования и вертикального оседания, оценки атмосферных эффектов и когерентности, а также верификации InSAR посредством GNSS и нивелирования. Расчётные диаграммы не являются новыми полевыми измерениями или готовыми порогами опасности для конкретного рудника.*
Ключевые слова: *InSAR, горнопромышленная территория, деформация земной поверхности, оседание, D-InSAR, постоянные рассеиватели, SBAS, когерентность, геометрия наблюдений, геодезический мониторинг.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF InSAR METHODS FOR MONITORING GROUND SURFACE DEFORMATION IN MINING AREAS

Botirov Shoxbos Soibjon ugli

Senior Lecturer, Termez State University of Engineering and Agrotechnology, Termez, Uzbekistan

Nomdorov Rustam Uralovich

Associate Professor, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Department of Geology and Mining Engineering, Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. *The capabilities of interferometric synthetic aperture radar for detecting and interpreting ground surface deformation in mining areas were comparatively assessed. The study examined six supplied images, five groups of application examples, and verified scientific literature. The Berezniki potash mine and Lost Hills oilfield were considered the principal industrial cases, while the Bam earthquake, the urban environment of Rome, and Alaskan volcanoes provided methodological comparisons. D-InSAR, persistent scatterer interferometry, and small-baseline time series were compared in terms of observation geometry, coherence, temporal coverage, and validation requirements. Reproducible analytical charts were developed to examine phase-to-displacement conversion and the effects of neglected horizontal motion. For illustrative wavelengths of 56.6 and 236 mm, a complete phase cycle corresponded to line-of-sight displacements of 28.3 and 118 mm, respectively. At a 35° incidence angle, a neglected horizontal displacement of 5 mm along the horizontal projection of the line of sight produced a 3.50 mm bias in the estimated vertical displacement. Image inspection revealed inconsistencies between some panel labels and the stated geographical objects. The findings support distinguishing line-of-sight displacement from vertical subsidence, evaluating atmospheric effects and coherence, and validating InSAR observations against GNSS and levelling measurements. The analytical charts represent neither new field observations nor operational hazard thresholds for a specific mine.*
Keywords: *InSAR, mining area, ground surface deformation, subsidence, D-InSAR, persistent scatterers, SBAS, coherence, observation geometry, geodetic monitoring.*

Kirish. Yer osti kon ishlarini olib borish, qazib olingan bo‘shliqlarning deformatsiyalanishi va suyuqlik chiqarish bilan bog‘liq bosim o‘zgarishlari yer yuzasida cho‘kish hamda differensial siljishlarni yuzaga keltirishi mumkin. Bunday jarayonlarning fazoviy qamrovi alohida geodezik nuqtalar oralig‘idan katta bo‘lganda, hududiy deformatsiya maydonini tavsiflash zarurati paydo bo‘ladi. Interferometrik sintetik aperturali radar — InSAR takroriy sun’iy yo‘ldosh tasvirlarining faza farqidan foydalanib, radar yo‘nalishidagi nisbiy siljishni baholash imkonini beradi. Ushbu xususiyat kon hududi, transport yo‘llari va unga tutash shahar infratuzilmasini birgalikda kuzatishda ahamiyatlidir (Gabriel et al., 1989; Rosen et al., 2000).

InSAR natijasining ilmiy qiymati rangli deformatsiya xaritasini olish bilan cheklanmaydi. Faza tarkibidagi deformatsiya, topografik qoldiq, atmosfera kechikishi va shovqin hissalarini ajratish, tayanch maydon barqarorligini tekshirish hamda o‘lchov geometriyasini to‘g‘ri talqin qilish talab etiladi. Shu sababli bitta interferogrammada ko‘ringan rang almashinishlarini bevosita vertikal cho‘kish yoki kelajakdagi avariya belgisi deb qabul qilish asosli emas (Hanssen, 2001).

Ilmiy adabiyotlar tahlili. Gabriel, Goldstein va Zebker (1989) differensial radar interferometriyasi yordamida kichik sirt siljishlarini keng maydonda kuzatish imkoniyatini ko‘rsatgan. Massonnet va hammualliflar (1993) Landers zilzilasi deformatsiya maydonini radar ma’lumotlari asosida xaritalashtirgan. Bu ishlar takroriy SAR tasvirlarining fazoviy o‘lchov vositasi sifatidagi salohiyatini namoyon etdi. Massonnet va Feigl (1998), shuningdek Rosen va hammualliflar (2000) usulning fizik asoslari, ishlov berish bosqichlari va qo‘llanish shartlarini tizimlashtirgan.

Ko‘p davrli tahlil usullarining rivojlanishi deformatsiya xaritasidan vaqt bo‘yicha monitoringga o‘tish imkonini berdi. Ferretti, Prati va Rocca (2001) uzoq tasvirlar qatorida barqaror sochuvchi nishonlardan foydalanish yondashuvini ishlab chiqqan. Berardino va hammualliflar (2002) kichik bazisli interferogrammalar tarmog‘i asosida siljish vaqt qatorlarini tiklash algoritmini taklif etgan. Hooper va hammualliflar (2004) tabiiy va vulqon relyeflaridagi barqaror piksellarni fazaviy xususiyatlar orqali ajratish imkoniyatini kengaytirgan. Bu uch yondashuvning birini tanlash hududning sirt qoplami va mavjud tasvirlar qatoriga bog‘liq.

Zebker va Villasenor (1992) interferometrik korrelyatsiyani kamaytiruvchi omillarni tavsiflagan; mazkur cheklov kon chiqindilari, o‘simlik, qor va faol o‘zgaruvchi sirtlarda ayniqsa muhimdir. Bekaert va hammualliflar (2015) troposfera tuzatish usullarini turli sharoitlarda qiyoslab, yordamchi ma’lumotlarning fazoviy va vaqt aniqligi bilan bog‘liq cheklovlarni ko‘rsatgan. Crosetto va hammualliflar (2016) doimiy sochuvchi nuqtalar interferometriyasining kuzatuv zichligi, sifat nazorati va amaliy talqin masalalarini umumlashtirgan. Demak, millimetr darajasidagi natija har qanday tasvir juftligi uchun avtomatik kafolat emas.

Konchilik misollarida Samsonov va Baryakh (2020) Berezniki hududidagi suv bosgan kaliy tuzi koni ustida RADARSAT-2 va Sentinel-1 ma’lumotlari yordamida cho‘kish jarayonini tadqiq etgan. Fielding va hammualliflar (1998) hamda Xu va hammualliflar (2001) Lost Hills va Belridge neft konlarida suyuqlik qazib olish bilan bog‘liq deformatsiyalarni baholagan. Ushbu ishlar kon hududidagi deformatsiya shaklini ishlab chiqarish va geomexanik ma’lumotlar bilan birgalikda talqin qilish zarurligini ko‘rsatadi.

Boshqa geodinamik sharoitlar usulning talqin chegaralarini tushunishga yordam beradi. Funning va hammualliflar (2005) Bam zilzilasi uchun turli orbitadagi interferogrammalar va azimut siljishlarini birlashtirgan. Stramondo va hammualliflar (2008) Rimda interferometrik nuqtaviy tahlilni geotexnik ma’lumotlar bilan bog‘lagan. Lu va Dzurisin (2014) Alyaska–Aleut vulqonlari monitoringining imkoniyatlari va cheklovlarini yoritgan. Biroq bu obyektlardagi deformatsiya mexanizmlari kon ishlari oqibatidagi cho‘kishga to‘g‘ridan to‘g‘ri tenglashtirilmaydi.

Tadqiqotning maqsadi kon hududlari monitoringiga oid taqdim etilgan InSAR misollarini tekshirilgan adabiyotlar bilan qiyoslash, tasvirlardan chiqarilishi mumkin bo‘lgan xulosalar chegarasini belgilash hamda faza–siljish va kuzatuv geometriyasi ta’sirini qayta hisoblanadigan diagrammalar orqali baholashdan iborat. Ishning tahliliy hissasi kon, seysmik, shahar va vulqon misollarini yagona talqin mezonlari bo‘yicha

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

solishtirish hamda ularni kon monitoringiga ko‘chirish shartlarini ajratishdan iborat.

Materiallar va tadqiqot usullari. Tadqiqot kon hududlarida yer yuzasi deformatsiyalarini InSAR usullari yordamida kuzatishga oid ilmiy ishlarning qiyosiy tahlili hamda o‘lchov sezgirligini analitik baholash asosida bajarildi. Berezniki kaliy tuzi koni va Lost Hills neft konidagi deformatsion jarayonlar asosiy tadqiqot misollari sifatida ko‘rib chiqildi. Bam zilzilasi, Rim shahar hududi va Alyaska vulqonlariga oid natijalar esa turli geodinamik sharoitlarda interferometrik kuzatuv-larning imkoniyatlarini solishtirish uchun tahlil qilindi. Tasviriy materiallar tarkibidagi oltita rastr tasvir deformatsiya maydonlarining fazoviy xususiyatlari va ularni talqin qilish shartlari bo‘yicha o‘rganildi.

Ilmiy adabiyotlarni tanlashda InSAR usulining fizik asoslari, differensial va ko‘p davrli interferometrik algoritmlar, o‘lchov xatolarining manbalari hamda kon hududlaridagi amaliy tadqiqotlarga ustuvorlik berildi. Tanlangan 19 ta manba asosida usullarning qo‘llanish sharoitlari, kuzatuv natijalarining ishonchliligiga ta’sir etuvchi omillar va mustaqil geodezik tekshiruv talablari umumlashtirildi.

1-jadval

InSAR yondashuvlarini tanlash mezonlari va cheklovlari

Yondashuv	Ma’lumot va natija	Mos sharoit	Asosiy cheklov va manba
D-InSAR	Ikki yoki bir nechta tasvir; davrlar oralig‘idagi LOS maydoni	Hodisadan oldingi va keyingi kogerent juftlik	Atmosfera va topografik qoldiq; Gabriel et al. (1989), Rosen et al. (2000)
PSI	Uzoq tasvirlar qatori; barqaror nishonlar tezligi va vaqt qatori	Bino, inshoot va barqaror radar nishonlari mavjudligi	Nishon zichligi va faza modeli; Ferretti et al. (2001), Crosetto et al. (2016)
SBAS	Kichik vaqt va fazoviy bazisli juftliklar tarmog‘i	Yetarli kogerent juftliklar va bog‘langan vaqt tarmog‘i	Tarmoq uzilishi, fazani ochish va inversiya; Berardino et al. (2002)
Ko‘p geometriyali tahlil	Turli orbitalar va zaruratda GNSS yoki azimut siljishlari	Komponentlarni ajratish uchun yetarli mustaqil kuzatuv	Bitta LOS uch komponentni bermaydi; Wright et al. (2004)

Amaliy misollar obyekt turi, deformatsiya mexanizmi, kuzatuv davri, o‘lchov birligi, siljish komponenti va natijalarni tekshirish imkoniyati bo‘yicha qiyoslandi. Radar yo‘nalishidagi siljish bilan vertikal harakatni farqlashga, shuningdek, kuzatuv geometriyasi va tasvir legendasining tal-qinga ta’sirini baholashga alohida e’tibor qaratildi. Birlamchi SAR ma’lumotlari va raqamli siljish qatorlari mavjud bo‘lmaganligi sababli, tahlil e’lon qilingan natijalar va tasviriy materiallar doirasida olib borildi. Analitik hisoblar faza–siljish bog‘lanishini hamda gorizontal harakatni e’tiborsiz qoldirishning vertikal siljish bahosiga ta’sirini aniqlashga yo‘naltirildi.

Faza va radar yo‘nalishidagi siljish. Interferometrik fazaning umumiy tarkibi quyidagi konseptual ko‘rinishda ifodalandi (Hanssen, 2001; Rosen et al., 2000):

$$\Delta\varphi_{obs} = \Delta\varphi_{def} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{orb} + \Delta\varphi_{noise} \quad (1)$$

Bu yerda $\Delta\varphi_{obs}$ — kuzatilgan faza farqi; $\Delta\varphi_{def}$ — deformatsiya hissasi; $\Delta\varphi_{topo}$ — topografik model qoldig‘i; $\Delta\varphi_{atm}$ — atmosfera hissasi; $\Delta\varphi_{orb}$ — orbita bilan bog‘liq qoldiq; $\Delta\varphi_{noise}$ — boshqa shovqinlar. Mazkur ajratish xatolar to‘liq yo‘qotilganini anglatmaydi, balki natijaga ta’sir qiluvchi tarkibiy qismlarni ko‘rsatadi.

$$|d_{LOS}| = \frac{\lambda|\Delta\varphi_{def}|}{4\pi} \quad (2)$$

Mazkur ifodada d_{LOS} sun’iy yo‘ldoshning kuzatish yo‘nalishi (Line of Sight — LOS) bo‘yicha yer yuzasi siljishini, λ esa radar signalining to‘lqin uzunligini ifodalaydi. Faza o‘zgarishi bilan siljish miqdori o‘rtasidagi bog‘liqlikni baholashda faza ishorasining dasturiy ta’minotda qabul qilingan konvensiyalarga bog‘liqligini hisobga olish maqsadida modul ko‘rinishidan foydalanildi. Hisoblash jarayonida C va L diapazonlari uchun mos ravishda $\lambda_C = 56.6$ mm va $\lambda_L = 236$ mm qiymatlari qabul qilindi. Ushbu parametrlar radar diapazonlarining to‘lqin uzunligi bo‘yicha farqlanishini tavsiflash va ularning siljishni aniqlashdagi xususiyatlarini qiyosiy baholash maqsadida tanlangan bo‘lib, tadqiqotda foydalanilgan tasvirlarning aniq sensori yoki ishlash chastotasi bilan bevosita bog‘lanmagan. Faza o‘zgarishi $\Delta\varphi$ ning qiymatlari 0 dan 2π gacha bo‘lgan oraliqda π/4 qadam bilan belgilandi. Hisoblash natijalarining aniqligini saqlash maqsadida olingan oraliq qiymatlar yaxlitlanmagan holda diagrammalarni shakllantirishda foyda-lanilgan ma’lumotlar to‘plamiga kiritildi.

Kuzatuv geometriyasi va hisobiy og‘ish.

Sun'iy yo'ldosh radar interferometriyasida bitta orbital kuzatuv geometriyasi asosida aniqlanadigan siljish yer yuzasining uch o'lchamli harakat vektorini radar signalining kuzatish yo'nalishiga (Line of Sight — LOS) proyeksiyalash orqali ifodalanadi. Bunda o'lchangan siljish qiymati yer yuzasidagi harakatning sharqiy, shimoliy va vertikal komponentlariga bog'liq bo'lib, yagona kuzatuv geometriyasi asosida ushbu komponentlarni bir-biridan mustaqil ravishda aniqlash imkoniyati cheklangan. Radar kuzatish yo'nalishini tavsiflovchi birlik vektorning sharqiy, shimoliy va vertikal yo'nalishlardagi komponentlari mos ravishda l_E, l_N va l_U bilan belgilansa, sun'iy yo'ldoshning kuzatish yo'nalishi bo'yicha siljish miqdori quyidagi matematik ifoda orqali aniqlanadi (Wright et al., 2004):

$$d_{LOS} = l_E u_E + l_N u_N + l_U u_U \quad (3)$$

Radar signalining tushish burchagi θ mahalliy vertikal yo'nalishga nisbatan aniqlanganda, sun'iy yo'ldoshning kuzatish yo'nalishi bo'yicha qayd etilgan siljish yer yuzasi harakatining gorizontal va vertikal komponentlari orqali ifodalanadi. Bunda u_H — gorizontal siljishning radar kuzatish yo'nalishi gorizontal proyeksiyasiga mos komponentini, u_U esa vertikal siljish komponentini tavsiflaydi. Ushbu komponentlarning radar kuzatish yo'nalishidagi umumiy siljishga qo'shgan hissasi $d_{LOS} = u_H sin\theta + u_U cos\theta$ munosabat orqali aniqlanadi. Agar hisoblash jarayonida gorizontal siljish komponenti e'tiborga olinmasa, ya'ni $u_H = 0$ deb faraz qilinsa, vertikal siljishning baholangan qiymatida sistematik og'ish yuzaga keladi. Mazkur og'ish gorizontal siljish miqdori va radar signalining tushish burchagiga bog'liq bo'lib, quyidagi matematik ifoda orqali aniqlanadi:

$$\hat{u}_U = \frac{d_{LOS}}{cos\,\theta}; \quad \delta u_U = \hat{u}_U - u_U = u_H \, tan\,\theta \quad (4)$$

Mazkur tadqiqotda kuzatuv geometriyasining vertikal siljishni baholash aniqligiga ta'sirini aniqlash maqsadida analitik sezgirlik hisoblari bajarildi. Hisoblashlarda gorizontal siljish komponenti uchun $u_H = 0$, 5 va 10 mm, radar signalining tushish burchagi uchun esa $\theta = 20°$, 25°, 30°, 35°, 40° va 45° qiymatlari qabul qilindi. Bunda u_H parametri gorizontal siljish vektorining to'liq modulini emas, balki ushbu vektorning radar kuzatish yo'nalishi gorizontal proyeksiyasiga mos keluvchi komponentini ifodalaydi. Tanlangan parametrlar asosida vertikal siljishni aniqlashda gorizontal harakatni hisobga olmaslik natijasida yuzaga keladigan sistematik og'ishning tushish burchagiga bog'liqligi baholandi. Olingan natijalar bevosita geodezik kuzatuvlar yoki eksperimental o'lchash ma'lumotlari sifatida emas, balki radar kuzatuv geometriyasining siljish komponentlarini baholashga ta'sirini nazariy jihatdan tavsiflovchi analitik hisoblash natijalari sifatida talqin qilindi.

Tasvirlar va diagrammalarning daliliy maqomi. Tadqiqotda foydalanilgan rastr xaritalar interferometrik tasvirlarda aks etgan deformatsiya xususiyatlarini aniqlash va ularni o'zaro qiyoslash maqsadida sifat jihatidan tahlil qilindi. Bunda tasvirlarning rangli ifodalanishi, deformatsiya zonalarining fazoviy taqsimlanishi va kuzatilgan o'zgarishlarning umumiy xususiyatlariga e'tibor qaratildi. Rastr tasvirlarda aks etgan rang qiymatlari asosida yer yuzasi siljishining maksimal miqdori, deformatsiya tezligi yoki o'lchash natijalarining statistik aniqligi hisoblanmadi. Chunki tahlil qilingan tasvirlar uchun yagona o'lchov shkalasi va o'zaro taqqoslanadigan miqdoriy ma'lumotlar mavjud emas. Shu sababli turli interferometrik tasvirlarning rang intensivligi asosida bevosita miqdoriy qiyoslash amalga oshirilmadi.

Tadqiqot doirasida shakllantirilgan yangi chiziqli diagrammalar (2) va (4) matematik ifodalar asosida bajarilgan analitik hisoblash natijalariga tayangan holda ishlab chiqildi. Mazkur diagrammalar Microsoft Word dasturining tahrirlash imkoniyatiga ega Chart obyektlari ko'rinishida shakllantirilib, ularning har biriga hisoblash natijalarini o'z ichiga olgan elektron jadvallar biriktirildi. Bu esa diagrammalardagi miqdoriy bog'liqliklarni tekshirish, boshlang'ich parametrlarni o'zgartirish va hisoblash natijalarini qayta tahlil qilish imkonini beradi. Dastlabki materiallarda mavjud bo'lgan rastr grafiklar esa ularning asl vizual tuzilishini saqlash maqsadida o'zgartirilmagan holda foydalanildi.

Natijalar. **Amaliy misollarni qiyosiy tahlil qilish**. Sun'iy yo'ldosh radar interferometriyasining yer yuzasi deformatsiyalarini aniqlashdagi qo'llanish xususiyatlarini baholash maqsadida turli geodinamik va texnogen sharoitlarni ifodalovchi beshta obyekt guruhi qiyosiy tahlil qilindi. Tadqiqot uchun tanlangan Berezniki va Lost Hills hududlari

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

konchilik hamda yer osti tabiiy resurslarini qazib olish faoliyati natijasida yuzaga keladigan texnogen deformatsiyalarni tavsiflovchi misollar sifatida ko‘rib chiqildi. Bam, Rim va Alyaska hududlari esa mos ravishda zilzila bilan bog‘liq koseysmik deformatsiyalar, urbanizatsiyalashgan hududlardagi geotexnik jarayonlar hamda vulqon faolligi ta’sirida shakllanadigan yer yuzasi siljishlarini o‘rganish nuqtayi nazaridan tahlil qilindi.

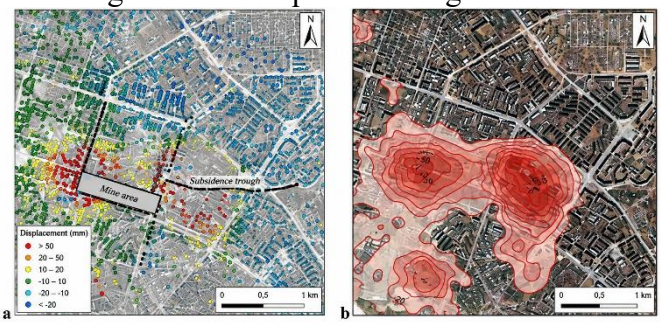
Mazkur obyektlarning qiyosiy tahlili radar interferometriyasi yordamida qayd etiladigan yer yuzasi deformatsiyalari turli tabiiy va antropogen jarayonlar natijasida shakllanishi mumkinligini ko‘rsatadi. Xususan, interferometrik kuzatuvlarda o‘xshash fazoviy siljish xususiyatlari qayd etilgan taqdirda ham, ularni yuzaga keltiruvchi fizik-geologik mexanizmlar, deformatsiyaning rivojlanish sharoitlari va dinamik xususiyatlari bir-biridan sezilarli darajada farqlanishi mumkin. Shu bois interferometrik ma’lumotlarni talqin qilishda hududning geologik tuzilishi, geodinamik sharoiti, texnogen ta’sir omillari va deformatsiyaning ehtimoliy kelib chiqish mexanizmlarini kompleks hisobga olish muhim ahamiyat kasb etadi. Tanlangan obyektlar bo‘yicha o‘tkazilgan qiyosiy tahlilning umumlashtirilgan natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

Amaliy obyektlar bo‘yicha dalillar va talqin chegaralari

Obyekt	Ilmiy dalil	Taqdim etilgan tasvirning cheklovi	Tekshirilgan qiyosiy manba
Berezniki	Suv bosgan kaliy tuzi koni ustidagi deformatsiya monitoringi	Dastlabki panellarda to‘liq birlik, davr va tayanch yo‘q	Samsonov & Baryakh (2020)
Bam	Turli geometriyalar asosida koseysmik komponentlarni ajratish	−20 va +30 sm yozuvlarining komponenti noma’lum	Funning et al. (2005)
Lost Hills	Neft qazib olish bilan bog‘liq cho‘kish; mustaqil nashrda 105 kunda 15 sm	Kompozitdagi vulqon nomlari Lost Hills talqiniga mos emas	Xu et al. (2001); Werner et al. (n.d.)
Rim	Shahar nishonlari va geotexnik sharoitni birgalikda baholash	Rang legendasi va kuzatuv sanalari yo‘q	Stramondo et al. (2008)
Alyaska	Vulqonlarda deformatsiya maydonlarini kuzatish	Turli rang shkalalari o‘zaro bir xil maksimumni bermaydi	Lu & Dzurisin (2014)

Berezniki kon hududida deformatsiya maydonining fazoviy xususiyatlari. Berezniki kon hududiga oid interferometrik tasvirlarni tahlil qilish natijasida yer yuzasi deformatsiyalarining fazoviy taqsimlanishida sezilarli nomutanosibliklar mavjudligi kuzatildi. Xususan, taqdim etilgan tasvirlarda turli rangli sohalar va izoliniyalar orqali ifodalangan lokal deformatsiya zonalari ajralib turadi (1-rasm). Mazkur zonalarning hudud bo‘ylab notekis joylashuvi deformatsiya jarayonlarining fazoviy jihatdan bir jinsli emasligini ko‘rsatadi. Tasvirlarning ayrim qismlarida izoliniyalarga tegishli sonli qiymatlar aks ettirilgan bo‘lsa-da, ularning o‘lchov birliklari, kuzatuv davri va hisoblashda foydalanilgan tayanch nuqtalar haqidagi ma’lumotlar yetarli darajada keltirilmagan. Shu sababli ushbu qiymatlarni millimetr yoki santimetr birliklaridagi ishonchli cho‘kish ko‘rsatkichlari sifatida talqin qilish hamda ular asosida deformatsiyaning mutlaq miqdorini aniqlash ilmiy jihatdan asoslanmagan. O‘tkazilgan sifat tahlili Berezniki kon hududida deformatsiya maydonining fazoviy o‘zgaruvchanligini tavsiflash imkonini berdi. Olingan natijalar lokal deformatsiya zonalarining chegaralari, siljishlarning fazoviy taqsimlanishi va ularning rivojlanish xususiyatlarini batafsil o‘rganishda kuzatuv nuqtalarining yetarli zichligini ta’minlash, shuningdek, interferometrik ma’lumotlarni mustaqil geodezik o‘lchash natijalari bilan birgalikda tahlil qilish zarurligini ko‘rsatadi.

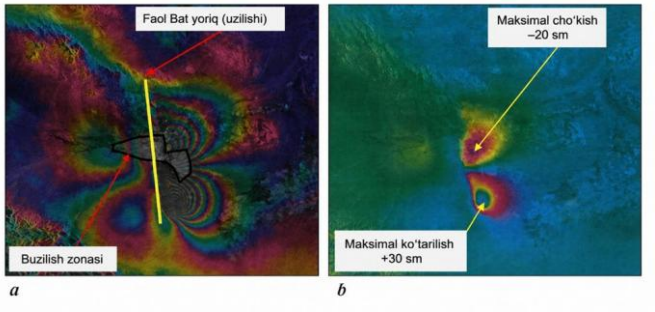


1-rasm. Berezniki hududidagi deformatsiya maydonining nuqtaviy (a) va izoliniyali (b) ko‘rinishlari.

Taqdim etilgan dastlabki materiallarda Berezniki kon hududida yuzaga kelgan suv bosish hodisasi 2007-yil bilan bog‘langan bo‘lsa-da, ilmiy manbalarni qiyosiy tahlil qilish ushbu jarayonning boshlanish davri va keyingi geodinamik oqibatlarini xronologik jihatdan farqlash zarurligini ko‘rsatadi. Xususan, Samsonov va Baryakh (2020) tadqiqotida

Berezniki-1 koniga suv kirishi 2006-yil 17-oktabrda boshlangani, 2007-yilda esa kon hududida yirik o‘pirilish hodisasi sodir bo‘lgani qayd etilgan. Mazkur ma’lumotlar asosida suvning yer osti kon lahimlariga kirib borishi va uning oqibatida yuzaga kelgan yer yuzasi deformatsiyalari bilan bog‘liq o‘pirilish hodisasi o‘zaro aloqador, biroq xronologik jihatdan alohida jarayonlar sifatida baholandi. Hududdagi deformatsiya jarayonlarini o‘rganishga bag‘ishlangan RADARSAT-2 va Sentinel-1 ma’lumotlariga asoslangan keyingi tadqiqotdan dastlabki interferometrik xaritalarning bevosita manbasi sifatida emas, balki Berezniki kon hududidagi geodinamik o‘zgarishlarni mustaqil ilmiy kuzatuvlar asosida tavsiflovchi manba sifatida foydalanildi. Bunday yondashuv dastlabki tasvirlarning kelib chiqishi bilan keyingi ilmiy tadqiqotlarda aniqlangan natijalarni o‘zaro farqlash hamda deformatsiya jarayonlarining rivojlanishini tarixiy va geodinamik jihatdan izchil talqin qilish imkonini beradi.

Bam zilzilasi misolida yer yuzasi siljish komponentlarining interferometrik ifodalanishi. Bam zilzilasi hududiga oid interferometrik kompozit tasvirni tahlil qilish natijasida yer yuzasidagi deformatsiya jarayonlarini aks ettiruvchi zich interferometrik chiziqlar, tektonik yorilish bilan bog‘liq hududlar hamda siljish miqdorini tavsiflovchi sonli belgilashlar mavjudligi aniqlandi (2-rasm). Xususan, tasvirda −20 sm va +30 sm qiymatlari bilan ifodalangan deformatsiya sohalari ajratib ko‘rsatilgan. Biroq mazkur kompozit tasvirda radar kuzatuvining orbital geometriyasi, sun’iy yo‘ldoshning qarash yo‘nalishi, signalning tushish burchagi hamda uch o‘lchamli siljish vektorini alohida komponentlarga ajratish metodikasi to‘g‘risidagi ma’lumotlar yetarli darajada keltirilmagan. Shu sababli tasvirda aks ettirilgan sonli qiymatlarni bevosita vertikal siljishning mutlaq minimum va maksimum ko‘rsatkichlari sifatida talqin qilish ilmiy jihatdan asoslanmagan. Ushbu tadqiqotda mazkur qiymatlar dastlabki tasvirga tegishli annotatsion ma’lumotlar sifatida saqlanib, ularning fizik mazmuni mustaqil geodezik o‘lchashlar yoki qo‘shimcha interferometrik hisoblashlar orqali tasdiqlangan natijalar sifatida baholanmadi. Mazkur holat radar interferometriyasi yordamida aniqlangan deformatsiyalarni talqin qilishda kuzatuv geometriyasini hisobga olish hamda radar qarash yo‘nalishi bo‘yicha o‘lchangan siljishlarni vertikal va gorizontal komponentlardan farqlash muhimligini ko‘rsatadi.



2-rasm. Bam hududiga oid interferometrik kompozit.

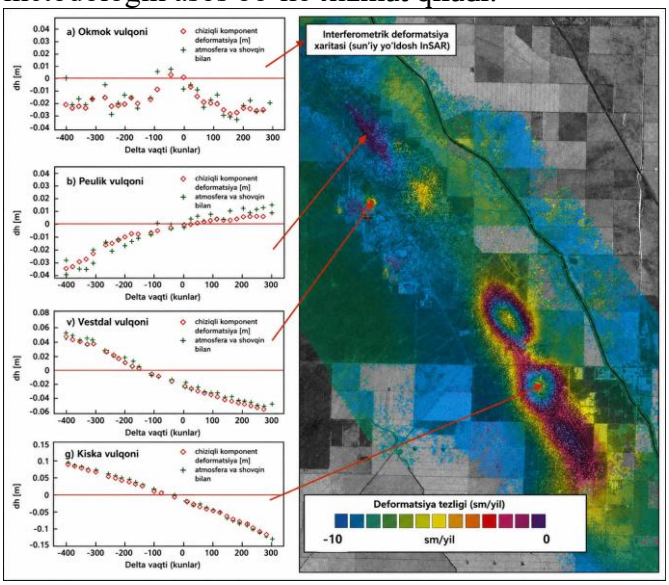
Funning va hammualliflar (2005) tomonidan 2003-yil 26-dekabrda Eronning Bam hududida sodir bo‘lgan zilzila natijasida yuzaga kelgan yer yuzasi deformatsiyalarini o‘rganish bo‘yicha olib borilgan tadqiqotda radar interferometriyasining ko‘p geometriyali kuzatuv imkoniyatlaridan foydalanilgan. Mazkur tadqiqotda sun’iy yo‘ldoshning ko‘tariluvchi va pasayuvchi orbitalarida olingan interferometrik ma’lumotlar radar tasvirlaridagi azimut yo‘nalishi bo‘yicha siljishlarni baholash natijalari bilan birlashtirilib, yer yuzasi harakatining uch o‘lchamli komponentlarini aniqlash amalga oshirilgan. Ushbu yondashuv yagona orbital kuzatuv geometriyasida olingan radar qarash yo‘nalishi (LOS) bo‘yicha siljish ma’lumotlari asosida yer yuzasi harakatining sharqiy, shimoliy va vertikal komponentlarini bir-biridan mustaqil ravishda aniqlash imkoniyati cheklanganligini ko‘rsatadi. Shu nuqtayi nazardan, Bam zilzilasi bo‘yicha olingan ilmiy natijalar konchilik faoliyati ta’sirida yuzaga keladigan yer yuzasi cho‘kishlarining fizik mexanizmlarini bevosita izohlash uchun emas, balki deformatsiya komponentlarini aniqlashda turli orbital geometriyalardagi radar kuzatuvlarini birlashtirishning metodologik ahamiyatini asoslash maqsadida qiyosiy misol sifatida ko‘rib chiqildi. Bunday yondashuv interferometrik o‘lchash natijalarini talqin qilishda kuzatuv geometriyasiga bog‘liq cheklovlarni hisobga olish va ko‘p yo‘nalishli radar ma’lumotlaridan foydalanish zaruratini ilmiy jihatdan asoslash imkonini beradi.

Lost Hills hududiga oid interferometrik

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

kompozit tasvirning muvofiqligini baholash. Dastlabki tadqiqot materiallarida Lost Hills hududidagi yer yuzasi deformatsiyalarini tavsiflovchi misol sifatida taqdim etilgan kompozit tasvirning tarkibiy elementlari tahlil qilindi. Mazkur tasvirning o‘ng qismida deformatsiyalarning fazoviy taqsimlanishini ifodalovchi xarita, chap qismida esa vaqt bo‘yicha o‘zgarishlarni aks ettiruvchi to‘rtta grafik joylashtirilgan (3-rasm). Grafik panellaridagi yozuvlarni o‘rganish natijasida ularda Lost Hills hududiga emas, balki Alyaskadagi Okmok, Peulik, Westdahl va Kiska vulqonlariga tegishli geografik nomlar keltirilganligi aniqlandi. Bu holat kompozit tasvirning umumiy sarlavhasi bilan uning tarkibidagi grafik panellarda ko‘rsatilgan tadqiqot obyektlari o‘rtasida mazmuniy nomuvofiqlik mavjudligini ko‘rsatadi. Shuningdek, grafiklarda aks ettirilgan ma’lumotlarning dastlabki manbasi, kuzatuv davri, vaqt shkalasi va koordinata qiymatlari to‘g‘risida yetarli ma’lumotlarning mavjud emasligi ularning miqdoriy ishonchliligini mustaqil tekshirish imkoniyatini cheklaydi. Shu sababli mazkur grafiklarda ifodalangan vaqt qatorlari raqamlashtirilmadi, Lost Hills hududidagi deformatsiya jarayonlarini tavsiflovchi bevosita kuzatuv natijalari sifatida qabul qilinmadi hamda yangi tahrirlanadigan diagrammalarga ko‘chirilmadi. Aniqlangan nomuvofiqlik interferometrik tadqiqotlarda foydalaniladigan kartografik va grafik materiallarning kelib chiqish manbalarini tekshirish, tasvir annotatsiyalarining tadqiqot obyektiga muvofiqligini baholash hamda turli hududlarga tegishli kuzatuv natijalarini o‘zaro farqlash muhimligini ko‘rsatadi.

Lost Hills neft koni hududida kuzatilgan yer yuzasi deformatsiyalari mustaqil ilmiy tadqiqotlar natijalari asosida tahlil qilindi. Xususan, Xu va hammualliflar (2001) tomonidan olib borilgan tadqiqotda 1995-yil 5-noyabrdan 1996-yil 17-fevralgacha bo‘lgan 105 kunlik kuzatuv davrida konning markaziy qismida yer yuzasining 15 sm gacha cho‘kishi aniqlangan. Mazkur miqdoriy ko‘rsatkich bevosita ushbu ilmiy nashrda keltirilgan tadqiqot natijalariga asoslangan bo‘lib, dastlabki materiallarda taqdim etilgan 3-rasmdan hisoblab olinmagan. Fielding va hammualliflar (1998) tomonidan amalga oshirilgan tadqiqotlarda esa sun’iy yo‘ldosh radar kuzatuvlari yordamida neft konlarida yuzaga keladigan jadal deformatsiya jarayonlarini aniqlash va ularning fazoviy xususiyatlarini baholash imkoniyatlari o‘rganilgan. Shuningdek, GAMMA kompaniyasi mutaxassislari Werner va hammualliflar (n.d.) tomonidan RADARSAT-1 sun’iy yo‘ldoshining 28 ta radar tasviri asosida 2002–2004-yillar oralig‘idagi yer yuzasi siljishlarini ko‘p bazisli interferometrik tahlil qilish va deformatsiyalarning vaqt qatorlarini shakllantirishga oid amaliy misol taqdim etilgan. Mazkur tadqiqotlar radar interferometriyasining neft qazib olish hududlarida yuzaga keladigan deformatsiya jarayonlarini aniqlash, ularning vaqt davomida rivojlanishini kuzatish va fazoviy taqsimlanishini baholashdagi imkoniyatlarini ilmiy jihatdan tavsiflaydi. Shu bilan birga, interferometrik kuzatuvlar asosida shakllantirilgan deformatsiya vaqt qatorlarini uglevodorodlarni qazib olish hajmi, qatlam bosimining o‘zgarishi va boshqa ishlab chiqarish ko‘rsatkichlari bilan birgalikda tahlil qilish yer yuzasi siljishlari hamda konni ekspluatatsiya qilish jarayonlari o‘rtasidagi ehtimoliy bog‘liqliklarni aniqlash uchun muhim metodologik asos bo‘lib xizmat qiladi.

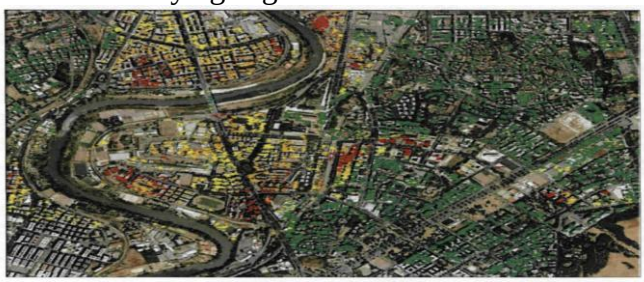


3-rasm. Boshlang‘ich hujjatda Lost Hills deb berilgan kompozit.

Rim va Alyaska hududlariga oid interferometrik kuzatuvlarning metodologik ahamiyati. Rim shahri hududiga oid interferometrik xaritani tahlil qilish natijasida radar kuzatuv nuqtalarining shahar infratuzilmasi obyektlari, xususan, bino va inshootlar hamda boshqa barqaror radar qaytaruvchi yuzalar bo‘ylab

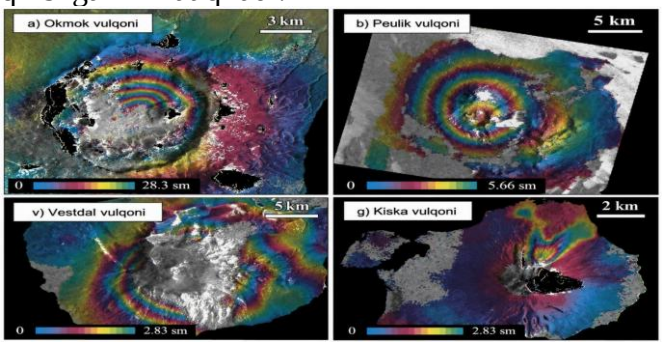
zich taqsimlanganligi kuzatildi (4-rasm). Mazkur fazoviy taqsimlanish urbanizatsiyalashgan hudud-larda sun'iy yo'ldosh radar interferometriyasi yordamida yer yuzasi va muhandislik inshoot-larining deformatsiyalarini kuzatish imkoniyatlarini namoyon etadi. Biroq taqdim etilgan xaritada rangli belgilarning miqdoriy mazmunini izohlovchi legenda, radar kuzatuvlarining aniq davri hamda siljishlarni hisoblashda foydalanilgan tayanch nuqta to'g'risidagi ma'lumotlar mavjud emas. Shu sababli xaritada aks ettirilgan rangli nuqtalarga deformatsiya tezligining aniq miqdoriy qiymatlari biriktirilmadi va ular mustaqil tasdiqlangan geodezik o'lchash natijalari sifatida talqin qilinmadi.

Stramondo va hammualliflar (2008) tomo-nidan Rim shahri misolida olib borilgan tadqiqotda interferometrik nuqtaviy nishonlarni tahlil qilish (Interferometric Point Target Analysis — IPTA) usuli asosida olingan natijalar hududning geotexnik va litostratigrafik xususiyatlarini tavsiflovchi ma'lumotlar bilan qiyosiy o'rganilgan. Bunday kompleks yondashuv radar interferometriyasi yordamida aniqlangan yer yuzasi siljishlarini faqat fazoviy deformatsiya ko'rsatkichlari sifatida emas, balki hududning muhandislik-geologik sharoitlari bilan o'zaro bog'liq jarayonlar sifatida baholash imkonini beradi. Xususan, deformatsiya kuzatilgan zonalarning geologik tuzilishi, grunt qatlamlarining litologik tarkibi va geotexnik xususiyatlarini hisobga olish yer yuzasi siljishlarining ehtimoliy sabablarini aniqlash hamda ularning muhandislik inshootlari barqarorligiga ta'sirini baholashda muhim ahamiyatga ega.



4-rasm. Rim shahar hududidagi rangli kuzatuv nuqtalari xaritasi.

Mazkur metodologik yondashuv konchilik faoliyati olib borilayotgan hududlarga tutash shahar infratuzilmasini monitoring qilishda ham qo'llanishi mumkin. Bunda interferometrik kuzatuv natijalarini hududning geologik tuzilishi, yer osti kon lahimlarining joylashuvi va mustaqil geodezik o'lchash ma'lumotlari bilan birgalikda tahlil qilish deformatsiya jarayonlarini yanada asosli talqin qilishga xizmat qiladi.



5-rasm. Okmok, Peulik, Westdahl va Kiska vulqonlariga oid interferometrik tasvirlar.

Alyaska hududidagi vulqon faolligi bilan bog'liq yer yuzasi deformatsiyalarini tavsiflovchi interferometrik kompozit tasvirda Okmok, Peulik, Westdahl va Kiska vulqonlari uchun radar interferometriyasi asosida aniqlangan fazaviy o'zgarishlarning fazoviy taqsimlanishi aks ettirilgan (5-rasm). Mazkur tasvirlarda kuzatiladigan interfe-rometrik rang sikllari radar signalining faza farqlari bilan bog'liq bo'lib, ular yer yuzasida sodir bo'lgan deformatsiya jarayonlarining fazoviy xususiyat-larini sifat jihatidan baholash imkonini beradi. Kompozit tasvirning quyi qismida joylashgan rang shkalalarida 28,3; 5,66 va 2,83 sm qiymatlari keltirilgan bo'lib, ushbu ko'rsatkichlar tasvirlarni ifodalashda qo'llanilgan rang shkalalarining miqdoriy parametrlarini tavsiflaydi. Biroq interfe-rometrik ma'lumotlarning to'liq legendasi, radar kuzatuv geometriyasi, kuzatuv davri hamda faza noaniqliklarini bartaraf etish (phase unwrapping) jarayoniga oid ma'lumotlar yetarli bo'lmaganligi sababli mazkur qiymatlarni alohida vulqon hududlarida qayd etilgan maksimal siljish miqdori yoki deformatsiyaning yillik tezligi sifatida talqin qilish ilmiy jihatdan asoslanmagan. Shuningdek, turli interferometrik tasvirlarda kuzatiladigan rang sikllari sonini bevosita taqqoslash orqali deformatsiya intensivligi yoki siljish miqdori haqida miqdoriy xulosa chiqarish mumkin emas. Chunki bunday baholash radar signalining to'lqin uzunligi, interferometrik fazaning siljishga aylantirilish koeffitsiyenti, tasvirlash shkalasi va kuzatuv geometriyasining o'zaro muvofiqligini talab etadi.

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

Shu sababli ushbu tadqiqotda Alyaska vulqonlariga oid interferometrik tasvirlar deformatsiya jarayonlarining fazoviy taqsimlanishini tavsiflovchi sifat ko‘rsatkichlari sifatida tahlil qilinib, ular asosida mustaqil miqdoriy siljish qiymatlari hisoblanmadi.

Lu va Dzurisin (2014) tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda vulqon faolligi natijasida yuzaga keladigan yer yuzasi deformatsiyalarini aniqlash va baholashda interferometrik kuzatuvlarning vaqt bo‘yicha ketma-ketligini tahlil qilish, yer yuzasi qoplamining fizik xususiyatlarini hisobga olish hamda radar interferometriyasi natijalarini mustaqil geofizik kuzatuv ma’lumotlari bilan kompleks ravishda o‘rganishning ahamiyati asoslab berilgan. Mazkur yondashuv vulqon hududlarida qayd etilgan deformatsiya jarayonlarining fazoviy va vaqt bo‘yicha rivojlanish xususiyatlarini aniqlash, shuningdek, kuzatilgan siljishlarning ehtimoliy geofizik sabablarini izohlash imkonini beradi. Hooper va hammualliflar (2004) tomonidan ishlab chiqilgan metodologik yondashuv esa tabiiy relyef sharoitida radar signalini barqaror qaytaruvchi nuqtalarni ajratish va ulardan interferometrik kuzatuvlarda foydalanish imkoniyatlarini ko‘rsatadi. Ushbu tadqiqotlarning qiyosiy tahlili konchilik faoliyati olib borilayotgan hududlarda radar interferometriyasi asosida deformatsiya monitoringini tashkil etishdan avval tabiiy radar qaytaruvchi nishonlarning fazoviy zichligi, signal kogerentligining saqlanish darajasi hamda yer yuzasi qoplamining interferometrik o‘lchashlarga ta’sirini baholash zarurligini ko‘rsatadi. Shu bilan birga, vulqon faolligi va konchilik faoliyati natijasida yuzaga keladigan deformatsiyalar turli fizik-geologik mexanizmlar bilan bog‘liq ekanligi inobatga olinib, vulqon hududlarida aniqlangan siljish xususiyatlari kon maydonlaridagi cho‘kish jarayonlarining bevosita belgisi sifatida talqin qilinmadi. Mazkur qiyosiy yondashuvdan turli geodinamik sharoitlarda interferometrik kuzatuvlarning metodologik imkoniyatlari va cheklovlarini baholash maqsadida foydalanildi.

Faza sezgirligi bo‘yicha analitik hisoblash natijalari. Radar interferometriyasida faza o‘zgarishi va sun’iy yo‘ldoshning kuzatish yo‘nalishi bo‘yicha yer yuzasi siljishi o‘rtasidagi matematik bog‘liqlikni baholash maqsadida C va L diapazonlari uchun qabul qilingan to‘lqin uzunliklari asosida analitik hisoblashlar amalga oshirildi. Hisoblash natijalari interferometrik fazaning bir to‘liq 2π siklga o‘zgarishi C diapazoni uchun qabul qilingan $\lambda_C = 56.6$ mm to‘lqin uzunligida 28,3 mm, L diapazoni uchun qabul qilingan $\lambda_L = 236$ mm to‘lqin uzunligida esa 118 mm radar kuzatish yo‘nalishidagi siljishga mos kelishini ko‘rsatdi (3-jadval, 6-rasm). Mazkur bog‘liqlik radar interferometriyasida faza o‘zgarishining siljish miqdoriga aylantirilishi signalning to‘lqin uzunligiga bevosita bog‘liq ekanligini ifodalaydi. Xususan, fazani aniqlashdagi noaniqlik har ikkala diapazon uchun bir xil deb faraz qilinganda, L diapazonida hisoblangan siljish noaniqligi C diapazoniga nisbatan taxminan 4,17 baravar yuqori bo‘lishi aniqlandi. Ushbu nisbat qabul qilingan radar to‘lqin uzunliklarining o‘zaro nisbatidan kelib chiqib, faza o‘zgarishining siljish qiymatiga aylantirilishidagi matematik sezgirlik farqini tavsiflaydi. Biroq mazkur natijani radar tizimlarining umumiy o‘lchash aniqligi yoki muayyan chastota diapazonining boshqa diapazonga nisbatan mutlaq ustunligi sifatida baholash mumkin emas. Chunki interferometrik o‘lchashlarning amaliy aniqligi radar signalining to‘lqin uzunligi bilan bir qatorda faza shovqini, interferometrik kogerentlik, atmosfera ta’siri, kuzatuv geometriyasi, fazani ochish algoritmlarining ishonchliligi hamda yer yuzasi qoplamining xususiyatlariga ham bog‘liq. Shu sababli olingan hisobiy natijalar C va L diapazonlarining faza–siljish bog‘liqligi bo‘yicha nazariy sezgirligini qiyosiy baholovchi ko‘rsatkichlar sifatida talqin qilindi.

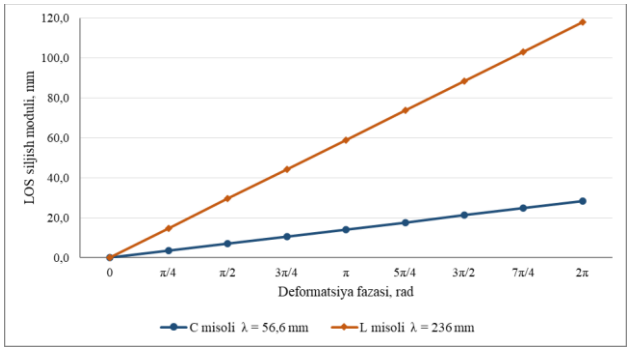
3-jadval

Faza–siljish bog‘lanishining hisobiy qiymatlari

Faza, rad	C misoli λ = 56,6 mm uchun |dLOS|, mm	L misoli λ = 236 mm uchun |dLOS|, mm
0	0,000	0,000
π/2	7,075	29,500
π	14,150	59,000
3π/2	21,225	88,500
2π	28,300	118,000

Radar interferometriyasida fazani aniqlashdagi qoldiq xatolikning yer yuzasi siljishini baholash natijalariga ta’sirini miqdoriy jihatdan tavsiflash maqsadida qo‘shimcha analitik hisoblashlar amalga oshirildi. Hisoblashlarda qoldiq faza xatosining shartli qiymati 0,1 rad deb qabul qilinib, (2) matematik ifoda asosida uning sun’iy

yo‘ldoshning kuzatish yo‘nalishi (LOS) bo‘yicha siljish miqdoriga ta’siri baholandi. Olingan natijalarga ko‘ra, mazkur faza xatosi C diapazoni uchun qabul qilingan to‘lqin uzunligida taxminan 0,45 mm, L diapazoni uchun esa 1,88 mm siljish xatosiga mos kelishi aniqlandi. Ushbu hisob-lashlarda har ikkala diapazon uchun qoldiq faza xatosi bir xil deb faraz qilingan bo‘lib, natijalar radar to‘lqin uzunligining faza xatoligini siljish qiymatiga aylantirishdagi ta’sirini nazariy jihatdan ifodalaydi. Biroq real interferometrik kuzatuvlarda faza xatolarining shakllanishi atmosfera va ionosferadagi elektromagnit to‘lqinlarning tarqalish sharoitlari, yer yuzasi qoplamining fizik xususiyatlari, interferometrik kogerentlik darajasi hamda radar sensorining texnik parametrlariga bog‘liq holda farqlanishi mumkin. Xususan, uzunroq radar to‘lqinlari ayrim tabiiy sirtlarda, jumladan, o‘simlik qoplami mavjud hududlarda vaqt bo‘yicha kogerentlikning nisbatan yaxshiroq saqlanishiga imkon berishi mumkin. Biroq ushbu xususiyat uzun to‘lqinli radar tizimlarining barcha atmosfera va ionosfera ta’sirlariga nisbatan kamroq sezgir ekanligini anglatmaydi. Shu sababli radar diapazonlarining deformatsiyalarni aniqlashdagi samaradorligini baholashda faza–siljish bog‘liqligi bilan bir qatorda kuzatuv muhitining xususiyatlari, signalning tarqalish sharoitlari va faza xatolarining shakllanish mexanizmlarini kompleks hisobga olish zarur.



6-rasm. Faza va LOS siljishi orasidagi hisobiy bog‘lanish (Muallif ishlanmasi).

Gorizontal siljish komponentining vertikal deformatsiyani baholashga ta’siri. Radar interferometriyasi yordamida aniqlangan yer yuzasi siljishlarini vertikal deformatsiya komponentiga aylantirishda gorizontal harakatning hisobga olinmasligi natijasida yuzaga keladigan sistematik og‘ishlarni baholash maqsadida turli gorizontal siljish qiymatlari va radar signalining tushish burchaklari uchun analitik hisoblashlar bajarildi. Hisoblash natijalariga ko‘ra, gorizontal siljish komponenti nolga teng bo‘lgan sharoitda ($u_H = 0$) qabul qilingan matematik model doirasida vertikal siljishni baholashda gorizontal harakatni e’tiborga olmaslik bilan bog‘liq sistematik og‘ish kuzatilmadi. Gorizontal siljish komponenti $u_H = 5$ mm deb qabul qilinganda esa radar signalining tushish burchagi $\theta = 20°$ bo‘lgan holatda vertikal siljishni baholashdagi og‘ish 1,82 mm, $\theta = 35°$ da 3,50 mm va $\theta = 45°$ da 5,00 mm ni tashkil etdi. Gorizontal siljish komponenti 10 mm gacha oshirilganda, qolgan parametrlar o‘zgarmagan sharoitda mazkur og‘ish qiymatlari mos ravishda 3,64; 7,00 va 10,00 mm gacha ortishi aniqlandi (4-jadval, 7-rasm).

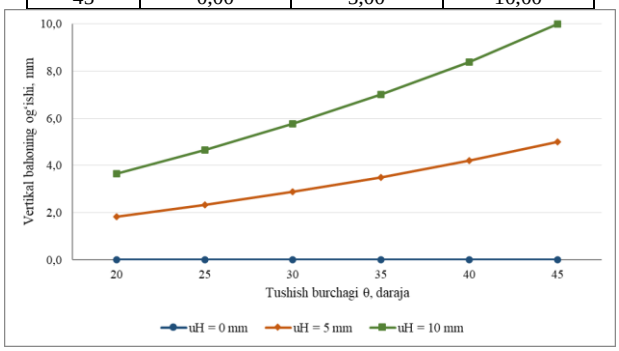
Olingan natijalar vertikal siljishni baholashda yuzaga keladigan sistematik og‘ish gorizontal harakat komponentining miqdori va radar signalining tushish burchagiga bevosita bog‘liq ekanligini ko‘rsatadi. Xususan, qabul qilingan modelda tushish burchagining ortishi bilan gorizontal siljishning vertikal deformatsiya bahosiga ta’siri kuchayadi. Bu holat hatto nisbatan kichik gorizontal siljishlar mavjud bo‘lgan sharoitda ham ularni hisobga olmaslik millimetr miqyosidagi deformatsiya ko‘rsatkichlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi mumkinligini tasdiqlaydi. Ayniqsa, konchilik faoliyati natijasida yuzaga keladigan yer yuzasi cho‘kishlarini yuqori aniqlikda monitoring qilishda mazkur geometrik omil muhim ahamiyat kasb etadi. Chunki kon maydonlarida shakllanadigan deformatsiya jarayonlari faqat vertikal cho‘kish bilan cheklanmasdan, cho‘kish zonasining markaziga yo‘nalgan yoki undan uzoqlashuvchi gorizontal siljish komponentlari bilan ham tavsiflanishi mumkin. Shu nuqtayi nazardan, radar kuzatish yo‘nalishi bo‘yicha o‘lchangan siljishlarni vertikal deformatsiya sifatida talqin qilishda gorizontal harakatning ehtimoliy ta’sirini baholash, zarur hollarda esa ko‘tariluvchi va pasayuvchi orbitalardagi interferometrik ma’lumotlarni mustaqil geodezik kuzatuv natijalari bilan birgalikda tahlil qilish maqsadga muvofiq hisoblanadi.

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

4-jadval

Gorizontal harakat e'tiborsiz qoldirilganda vertikal bahoning hisobiy og'ishi

θ, daraja	uH = 0 mm uchun δuU, mm	uH = 5 mm uchun δuU, mm	uH = 10 mm uchun δuU, mm
20	0,00	1,82	3,64
25	0,00	2,33	4,66
30	0,00	2,89	5,77
35	0,00	3,50	7,00
40	0,00	4,20	8,39
45	0,00	5,00	10,00



7-rasm. E'tiborsiz qoldirilgan gorizontal komponentning vertikal bahoga hisobiy ta'siri. Chiziqlar (4) formula bo'yicha tuzilgan (Muallif ishlanmasi).

Gorizontal siljish komponentining vertikal deformatsiyani baholashga ta'siri nafaqat uning miqdoriga, balki harakat yo'nalishiga ham bog'liq. Xususan, gorizontal siljish radar kuzatish yo'nalishining gorizontal proyeksiyasiga qarama-qarshi yo'nalgan holatlarda yuzaga keladigan sistematik og'ish vertikal siljishning hisoblangan qiymatini kamaytirishi mumkin. Shu sababli vertikal deformatsiyani baholashda gorizontal harakatning yo'nalishi va miqdorini hisobga olish muhim ahamiyatga ega. Tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan hisobiy diagrammalar muayyan kon hududida kuzatilgan cho'kish jarayonlarining vaqt bo'yicha rivojlanishini yoki interferometrik natijalarning GNSS o'lchashlari bilan qiyoslanishini ifodalamaydi. Mazkur diagrammalar radar kuzatuv geometriyasining vertikal siljishni aniqlashga ta'sirini analitik jihatdan baholash, shuningdek, siljish komponentlarini ajratish jarayonida radar signalining tushish burchagi va gorizontal harakat to'g'risida qabul qilingan farazlarning asoslanganligini tekshirish maqsadida shakllantirildi.

Muhokama. Kon hududlarida deformatsiya monitoringi uchun interferometrik usullarni tanlash. O'tkazilgan qiyosiy tahlil natijalari kon hududlarida yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilish uchun radar interferometriyasi usullarini tanlashda deformatsiya jarayonlarining fizik-geologik mexanizmlari bilan bir qatorda yer yuzasi qoplamining radar signallarini qaytarish xususiyatlari, interferometrik kogerentlik darajasi hamda mavjud sun'iy yo'ldosh tasvirlarining vaqt bo'yicha taqsimlanishini kompleks hisobga olish zarurligini ko'rsatadi. Xususan, differensial radar interferometriyasi (D-InSAR) usuli turli kuzatuv sanalari oralig'ida yuzaga kelgan yer yuzasi siljishlarining fazoviy taqsimlanishini aniqlash va alohida deformatsiya hodisalarini baholashda qo'llanishi mumkin. Biroq mazkur usulning samaradorligi tasvirlar oralig'idagi interferometrik kogerentlikning saqlanishi, atmosfera ta'sirining darajasi va deformatsiya jarayonlarining xususiyatlariga bog'liq.

Bino va muhandislik inshootlari zich joylashgan urbanizatsiyalashgan hududlarda doimiy radar qaytaruvchi nuqtalarga asoslangan interferometrik tahlil (Persistent Scatterer Interferometry — PSI) usuli deformatsiya jarayonlarini yuqori fazoviy zichlikdagi nuqtaviy kuzatuvlar orqali baholash imkonini berishi mumkin. Tabiiy yer yuzasi qoplami ustun bo'lgan va barqaror nuqtaviy radar qaytaruvchilar nisbatan kam uchraydigan hududlarda esa kichik bazisli interferometrik tarmoqlarga asoslangan SBAS (Small Baseline Subset) yondashuvidan foydalanish maqsadga muvofiq bo'lishi mumkin. Ushbu usul fazoviy va vaqt bazislari nisbatan kichik bo'lgan interferogrammalarni birlashtirish orqali deformatsiyaning vaqt bo'yicha o'zgarishini baholashga xizmat qiladi. Shunga qaramay, mazkur usullarning muayyan hududda yuqori aniqlikdagi natijalarni ta'minlashi oldindan kafolatlanmaydi. Shu sababli interferometrik tahlil usulini tanlashdan avval mavjud SAR tasvirlarining orbital qamrovi, vaqt bo'yicha takrorlanish davri, kogerentlik xaritalari va radar qaytaruvchi nishonlarning fazoviy taqsimlanishi baholanishi lozim.

Interferometrik kuzatuvlar asosida shakllantirilgan deformatsiya vaqt qatorlarini tahlil qilishda siljishlarning vaqt bo'yicha rivojlanish xususiyatlarini to'g'ri talqin qilish alohida ahamiyatga ega. Xususan, deformatsiya vaqt qatorini chiziqli matematik model yordamida approksimatsiya qilish

kuzatuv davri uchun o‘rtacha siljish tezligini baholash imkonini bersa-da, deformatsiya jarayonlarining mavsumiy tebranishlari, keskin bosqichli o‘zgarishlari yoki vaqt davomida tezlashish xususiyatlarini yetarli darajada aks ettirmasligi mumkin. Werner va hammualliflar tomonidan keltirilgan ko‘p bazisli inter-ferometrik inversiya natijalari vaqt qatorlarini qayta tiklash jarayonida qo‘llaniladigan silliqlash parameter-larining tanlanishi deformatsiya dinamikasining hisoblangan shakliga ta’sir ko‘rsatishini namoyon etadi. Bu holat interferometrik vaqt qatorlarini talqin qilishda ma’lumotlarga matematik ishlov berish usullari va parametrlarini hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi.

Shu nuqtayi nazardan, konchilik faoliyati natijasida yuzaga keladigan yer yuzasi defor-matsiyalari bilan qazib olish jarayonlarining o‘zgarishi o‘rtasidagi bog‘liqlikni baholashda dastlabki interferometrik kuzatuv ma’lumotlari, deformatsiya vaqt qatorlaridagi uzilishlar, kuzatuv davrlari hamda ma’lumotlarga ishlov berishda qabul qilingan matematik parametrlar birgalikda tahlil qilinishi lozim. Bunday yondashuv deformatsiya jarayonlarining vaqt bo‘yicha o‘zgarishini yanada asosli baholash va ularning konchilik faoliyati bilan ehtimoliy bog‘liqligini aniqlash imkonini beradi.

Interferometrik kuzatuvlarning sifati va deformatsiya natijalarini fizik talqin qilish. Radar interferometriyasi yordamida olingan deformatsiya natijalarining ishonchliligi interfe-rometrik fazaning barqarorligi, kuzatuv geomet-riyasi, atmosfera sharoitlari va ma’lumotlarga ishlov berish algoritmlarining xususiyatlariga bevosita bog‘liq. Interferometrik kogerentlikning yuqori bo‘lishi turli kuzatuv sanalarida qayd etilgan radar signallari orasidagi kompleks korrel-yatsiyaning yuqoriligini ko‘rsatadi. Biroq ushbu ko‘rsatkichning yuqori qiymatga ega bo‘lishi interferometrik fazada atmosfera ta’siri yoki boshqa sistematik xatoliklar mavjud emasligini anglat-maydi. Xususan, troposferadagi atmosfera sharoit-larining fazoviy jihatdan izchil o‘zgarishi natijasida yuzaga keladigan faza kechikishlari yuqori kogerentlik saqlangan interferogrammalarda ham yer yuzasi deformatsiyalariga o‘xshash fazoviy xususiyatlarni shakllantirishi mumkin.

Bekaert va hammualliflar (2015) tomonidan muhokama qilingan atmosfera ta’sirini kamaytirish usullarining qo‘llanishi hududning relyef xususiyatlari, meteorologik sharoitlari hamda yordamchi atmosfera ma’lumotlarining mavjud-ligiga bog‘liq. Shu sababli interferometrik kuzatuvlarga atmosfera tuzatishlarini kiritishda muayyan hududning tabiiy-geografik sharoitlarini hisobga olish, tanlangan tuzatish usulining asoslanganligini tekshirish va tuzatishdan keyin saqlanib qolgan qoldiq faza xatolarini baholash talab etiladi. Bunda qoldiq fazaning fazoviy masofa, relyef balandligi va boshqa ehtimoliy ta’sir omillari bilan bog‘liqligini tahlil qilish atmosfera ta’sirining to‘liq bartaraf etilmagan komponentlarini aniqlashga yordam berishi mumkin.

Shuningdek, uzunroq to‘lqinli radar kuzatuvlarining ayrim tabiiy sirtlarda interfe-rometrik kogerentlikni nisbatan yaxshiroq saqlash xususiyatini barcha relyef va atmosfera sharoitlarida yuqori o‘lchash barqarorligini ta’minlovchi universal afzallik sifatida talqin qilish ilmiy jihatdan asoslanmagan. Chunki radar signalining to‘lqin uzunligidan qat’i nazar, murakkab relyef sharoitida geometrik soyalanish, radar tasvirida turli balandlikdagi obyektlarning ustma-ust aks etishi (layover), yer yuzasi qoplamining vaqt davomida o‘zgarishi hamda interferometrik fazani ochish jarayonidagi xatoliklar kuzatilishi mumkin. Mazkur omillar radar kuzatuvlarining fazoviy qamrovi va deformatsiya natijalarining ishonchliligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

Interferometrik fazani ochish jarayonida yuzaga keladigan xatoliklar siljish qiymatlarining noto‘g‘ri baholanishiga sabab bo‘lishi mumkin. Xususan, fazani ochishda bir yoki bir nechta to‘liq 2π sikl miqdoridagi xatolik yuzaga kelsa, radar kuzatish yo‘nalishi bo‘yicha hisoblangan siljish qiymatida mos ravishda bir yoki bir nechta $\lambda/2$ miqdoridagi sistematik og‘ish paydo bo‘lishi mumkin. Ushbu tadqiqotda ishlab chiqilgan 6-rasmda faza o‘zgarishining siljish miqdoriga aylantirilish xususiyatlari C va L diapazonlari uchun analitik jihatdan ifodalangan. Biroq mazkur hisoblashlar muayyan kon hududida fazani ochish xatoliklari mavjudligini aniqlash yoki ularning fazoviy taqsimlanishini baholash uchun yetarli emas. Ular faqat faza xatolarining siljish qiymatiga ta’sirini nazariy jihatdan tavsiflash imkonini beradi.

Radar interferometriyasi asosida aniqlana-digan yer yuzasi siljishlari tanlangan fazoviy va vaqt

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

bo‘yicha tayanchlarga nisbatan hisoblanadigan kattaliklar hisoblanadi. Shu sababli interferometrik natijalarni talqin qilishda tayanch nuqtaning joylashuvi, uning deformatsiya jarayonlariga nisbatan barqarorligi hamda kuzatuv sanalarining o‘zaro muvofiqligi muhim ahamiyat kasb etadi. Xususan, konchilik faoliyati ta’sirida deformatsiyalanayotgan hududda joylashgan nuqtadan tayanch sifatida foydalanish butun kuzatuv maydoni bo‘yicha hisoblangan nisbiy siljish yoki deformatsiya tezligi qiymatlarida sistematik siljishga olib kelishi mumkin.

Interferometrik kuzatuv natijalarini global navigatsiya sun’iy yo‘ldosh tizimlari (GNSS) yoki geometrik nivelirlash ma’lumotlari bilan qiyoslashda koordinata tizimlari, kuzatuv yo‘nalishlari, o‘lchash davrlari va tayanch nuqtalarining o‘zaro muvofiqligi ta’minlanishi zarur. Chunki InSAR yordamida o‘lchangan siljish radar kuzatish yo‘nalishi (LOS) bo‘yicha aniqlansa, geometrik nivelirlash natijalari asosan balandlik farqlarining o‘zgarishini ifodalaydi. Shu sababli radar kuzatish yo‘nalishidagi siljish qiymatlarini gorizontal harakat komponentlarining ta’sirini baholamasdan vertikal nivelirlash natijalari bilan bevosita taqqoslash o‘lchash usullarining aniqligi va ishonchliligi to‘g‘risida noto‘g‘ri xulosalar shakllanishiga sabab bo‘lishi mumkin. Mazkur holat interferometrik ma’lumotlarni mustaqil geodezik kuzatuvlar bilan integratsiyalashda kuzatuv geometriyasini hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi.

Deformatsiya monitoringi natijalaridan muhandislik xavfini baholashda foydalanish. Konchilik faoliyati natijasida yuzaga keladigan yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilish natijalari hududdagi geodinamik jarayonlarning rivojlanishini baholash va muhandislik xavfsizligini ta’minlash uchun muhim axborot manbai hisoblanadi. Biroq interferometrik kuzatuvlarda qayd etilgan katta siljish qiymatining o‘zi muayyan hududda avariya yoki geotexnik buzilish sodir bo‘lish ehtimolini bevosita aniqlash uchun yetarli emas. Muhandislik xavfini baholashda deformatsiyaning mutlaq va nisbiy miqdorlari bilan bir qatorda cho‘kish gradienti, siljish tezligining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi, deformatsiya jarayonining tezlashishi, ta’sir zonasining fazoviy chegaralari, muhandislik inshootlarining konstruktiv xususiyatlari hamda yer osti kon lahimlarining geomekanik holatini kompleks hisobga olish talab etiladi.

Shuningdek, interferometrik kuzatuv nuqtasining bino tomi yoki boshqa muhandislik konstruksiyasida joylashganligi ushbu nuqtada aniqlangan siljish qiymati yer yuzasining deformatsiyasini to‘liq ifodalashini anglatmaydi. Chunki radar signalini qaytaruvchi konstruktiv elementlarning harakati ayrim hollarda binoning umumiy siljishi, konstruksiyaning mahalliy deformatsiyasi yoki harorat ta’sirida yuzaga keladigan o‘zgarishlar bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Shu sababli kon hududlariga tutash urbanizatsiyalashgan maydonlarda interferometrik monitoringni tashkil etishda nazorat qilinadigan muhandislik obyektlarining xususiyatlariga mos kuzatuv nuqtalarini tanlash, barqaror geodezik tayanch tarmog‘ini shakllantirish hamda radar kuzatuvlarini mustaqil geodezik o‘lchashlar bilan birgalikda olib borish maqsadga muvofiq hisoblanadi.

Kon hududlarida kompleks deformatsiya monitoringi tizimini tashkil etish dastlabki geologik, kon-texnik va geodezik ma’lumotlarni tizimlashtirishdan boshlanishi lozim. Bunda yer osti kon lahimlarining joylashuvi, qazib olish ishlari olib borilayotgan maydonlar, gidrogeologik sharoitlar, mavjud muhandislik inshootlari va boshqa xavfga sezgir obyektlar to‘g‘risidagi ma’lumotlarni yagona geofazoviy axborot bazasida birlashtirish muhim ahamiyatga ega. Keyingi bosqichda hududning sun’iy yo‘ldosh radar kuzatuvlari bilan qamrab olinishi, mavjud SAR tasvirlarining vaqt bo‘yicha taqsimlanishi va interferometrik kogerentlik ko‘rsatkichlari baholanib, kuzatuv sharoitlariga mos D-InSAR, PSI yoki SBAS usullari tanlanishi mumkin.

Interferometrik ma’lumotlarga ishlov berish natijasida shakllantirilgan deformatsiya xaritalari va vaqt qatorlari mustaqil dala geodezik kuzatuvlari bilan qiyoslangandan so‘ng hududga xos deformatsiya ko‘rsatkichlarini aniqlash hamda ularning o‘zgarishini nazorat qilish mezonlarini ishlab chiqish imkoniyati yuzaga keladi. Mazkur yondashuv kon hududlarida deformatsiya monitoringini bosqichma-bosqich tashkil etishga qaratilgan metodologik tavsiya sifatida taklif qilinmoqda. Biroq u muayyan kon uchun amaliy sinovlardan o‘tkazilgan va tasdiqlangan monitoring

reglamenti yoki barcha kon-geologik sharoitlarda qo‘llanishi mumkin bo‘lgan universal ogohlantirish mezonlari sifatida talqin qilinmaydi.

Tadqiqot natijalarining cheklovlari. Mazkur tadqiqot natijalari sun’iy yo‘ldosh radar interferometriyasining kon hududlaridagi deformat-siyalarni aniqlash imkoniyatlariga bag‘ishlangan ilmiy adabiyotlar, mavjud interferometrik tasvirlar va analitik hisoblashlarning qiyosiy tahliliga asoslangan. Tadqiqot doirasida dastlabki SAR tasvirlari arxivini qayta ishlash, yangi inter-ferogrammalar shakllantirish yoki deformatsiya vaqt qatorlarini bevosita radar kuzatuvlaridan hisoblash ishlari amalga oshirilmadi. Shuningdek, interferometrik kuzatuv natijalarining aniqligini tekshirish maqsadida yangi GNSS yoki geometrik nivelirlash o‘lchashlari bajarilmadi. Shu sababli tadqiqot natijalari muayyan kon hududidagi deformatsiyalar miqdorini eksperimental tasdiqlash yoki radar interferometriyasi usullarining amaliy o‘lchash aniqligini bevosita baholash imkonini bermaydi.

Tahlil qilingan rastr tasvirlarning ayrimlarida kuzatuv sanalari, radar sensorining texnik parametrlari, orbital geometriya, to‘liq legenda va fazoviy tayanch ma’lumotlarining mavjud emasligi deformatsiya tezligi, siljishlarning mutlaq qiymatlari hamda ularning vaqt bo‘yicha rivojlanishini miqdoriy jihatdan qayta hisoblash imkoniyatini chekladi. Xususan, 3-rasmda keltirilgan kompozit tasvirning sarlavhasi bilan uning tarkibidagi grafik panellarda ko‘rsatilgan geografik obyektlar nomlari o‘rtasidagi nomuvofiqlik mazkur grafiklardan Lost Hills kon hududiga tegishli mustaqil miqdoriy kuzatuv ma’lumotlari sifatida foydalanishga imkon bermadi. Bundan tashqari, foydalanilgan rastr tasvirlarning dastlabki nashr manbalari va ulardan qayta foydalanish shartlarini aniqlashtirish ilmiy maqolani yakuniy nashrga tayyorlash jarayonida bajarilishi lozim bo‘lgan muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

Tadqiqot doirasida bajarilgan analitik hisoblashlarda interferometrik o‘lchashlarga ta’sir etuvchi ayrim omillar maqsadli ravishda soddalashtirildi. Jumladan, birinchi hisoblash modelida radar signalining to‘lqin uzunligi bilan interferometrik faza o‘zgarishi o‘rtasidagi matematik bog‘liqlik alohida ko‘rib chiqilgan bo‘lsa, ikkinchi modelda gorizontal siljishning radar kuzatish yo‘nalishi bo‘yicha proyeksiyasi vertikal deformatsiyani baholashda yuzaga keltiradigan sistematik og‘ish tahlil qilindi. Mazkur modellar real interferometrik kuzatuvlardagi shovqin komponentlarining kovariatsion tuzilishini, fazani ochish algoritmlarining murakkab xususiyatlarini yoki kon hududidagi deformatsiya jarayonlarining to‘liq geomekanik modelini ifodalamaydi.

Shunga qaramay, hisoblashlarda foydalanilgan parametrlarning aniq belgilanganligi va matematik bog‘liqliklarning ochiq ifoda-langanligi olingan natijalarni qayta hisoblash, turli kuzatuv sharoitlari uchun nazariy sezgirlikni baholash hamda interferometrik ma’lumotlarni talqin qilishda qabul qilinadigan farazlarni tekshirish imkonini beradi. Ushbu jihatlar tadqiqotda ishlab chiqilgan analitik yonda-shuvlardan keyingi eksperimental kuzatuvlarni rejalashtirish va kon hududlarida deformatsiya monitoringi metodikasini takomillashtirishda foydalanish mumkinligini ko‘rsatadi.

Xulosa. Kon hududlari va ulardagi deformatsiya jarayonlarini o‘rganishga metodologik jihatdan aloqador bo‘lgan beshta amaliy obyekt guruhining qiyosiy tahlili sun’iy yo‘ldosh radar interferometriyasi yer yuzasi siljishlarining fazoviy taqsimlanishi hamda vaqt bo‘yicha rivojlanish xususiyatlarini baholashda muhim imkoniyatlarga ega ekanligini ko‘rsatdi. Shu bilan birga, interferometrik kuzatuvlar asosida olinadigan natijalarning ishonchliligi radar kuzatuv geometriyasi, yer yuzasi qoplamining barqarorligi, interferometrik kogerentlik darajasi, atmosfera ta’siri va ma’lumotlarga ishlov berish jarayonida amalga oshiriladigan sifat nazorati bilan uzviy bog‘liqligi aniqlandi. Berezniki va Lost Hills hududlariga oid ilmiy materiallar konchilik faoliyati hamda yer osti suyuqlik resurslarini qazib olish natijasida yuzaga keladigan texnogen deformatsiyalarni tavsiflash imkonini bergan bo‘lsa, Bam, Rim va Alyaska misollari radar kuzatuv geometriyasining ahamiyati, siljish komponentlarini ajratishdagi metodologik cheklovlar hamda interferometrik natijalarni mustaqil geologik va geodezik ma’lumotlar bilan birgalikda talqin qilish zarurligini ko‘rsatdi.

Radar interferometriyasining faza sezgirligini baholash bo‘yicha bajarilgan analitik hisoblashlarda

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 4, № 3-1
2026

C va L diapazonlari uchun mos ravishda 56,6 va 236 mm shartli to‘lqin uzunliklari qabul qilindi. Hisoblash natijalariga ko‘ra, interferometrik fazaning bir to‘liq 2π siklga o‘zgarishi C diapazoni misolida 28,3 mm, L diapazoni misolida esa 118 mm radar kuzatish yo‘nalishidagi siljishga mos kelishi aniqlandi. Ushbu natijalar radar signalining to‘lqin uzunligi faza o‘zgarishini siljish miqdoriga aylantirish jarayonidagi matematik sezgirlikni belgilovchi muhim parametr ekanligini ko‘rsatadi. Biroq mazkur bog‘liqlikning o‘zi turli radar diapazonlarining umumiy o‘lchash aniqligini yoki amaliy monitoringdagi ustunligini to‘liq tavsiflamaydi.

Kuzatuv geometriyasining vertikal deformatsiyani baholashga ta’sirini aniqlash bo‘yicha o‘tkazilgan hisoblashlarda radar qarash yo‘nalishining gorizontal proyeksiyasi bo‘yicha 5 mm siljishni e’tiborga olmaslik signalning 35° tushish burchagida vertikal siljish bahosining 3,50 mm ga og‘ishiga olib kelishi aniqlandi. Mazkur natija radar kuzatish yo‘nalishi bo‘yicha o‘lchangan siljishlarni bevosita vertikal deformatsiya sifatida talqin qilishda gorizontal harakat komponentlarining ta’sirini hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi. Shuningdek, faza sezgirligi, interferometrik o‘lchash aniqligi va siljish komponentlarini geometrik ajratish bilan bog‘liq xatoliklarni o‘zaro farqlash deformatsiya natijalarining fizik mazmunini to‘g‘ri baholash uchun muhim metodologik shart ekanligi asoslandi.

Tadqiqot davomida dastlabki materiallar tarkibidagi oltita rastr tasvir saqlanib, ularning ilmiy talqiniga ta’sir etuvchi manba, legenda va metama’lumotlar bilan bog‘liq cheklovlar aniqlashtirildi. Xususan, Lost Hills hududiga oid deb taqdim etilgan kompozit tasvir tarkibida Alyaska vulqonlariga tegishli grafiklarning mavjudligi aniqlanib, mazkur grafiklardan kon hududidagi deformatsiyalarning miqdoriy vaqt qatorlarini shakllantirishda foydalanilmadi. Bu holat interferometrik tasvirlar va grafik materiallardan ilmiy tadqiqotlarda foydalanishdan avval ularning geografik mansubligi, dastlabki manbasi va o‘lchov parametrlarini tekshirish zarurligini ko‘rsatadi.

Tadqiqot natijalari asosida kon hududlarida deformatsiya monitoringi tizimini yanada takomillashtirish uchun to‘liq metama’lumotlarga ega SAR tasvirlaridan foydalanish, ko‘tariluvchi va pasayuvchi orbitalardagi interferometrik kuzatuvlarni umumiy koordinata hamda tayanch tizimiga keltirish, shuningdek, olingan natijalarni GNSS va geometrik nivelirlash ma’lumotlari bilan birgalikda tahlil qilish tavsiya etiladi. Bunday kompleks yondashuv yer yuzasi siljishlarining fazoviy va vaqt bo‘yicha rivojlanishini ishonchliroq baholash, deformatsiya komponentlarini ajratishdagi noaniqliklarni kamaytirish hamda interferometrik kuzatuv natijalarining geodezik asoslanganligini tekshirish imkonini beradi. Kelgusida mazkur yondashuvni muayyan konning geologik, gidrogeologik va geomekanik sharoitlariga moslashtirish orqali deformatsiya monitoringining amaliy sxemasini ishlab chiqish, muhandislik infratuzilmasiga ta’sir etuvchi xavf omillarini baholash va hududga xos nazorat mezonlarini ilmiy jihatdan asoslash imkoniyati yaratiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

[1] Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., & Parker, D. J. (2015). Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. Remote Sensing of Environment, 170, 40–47. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035

[2] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), 2375–2383. https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792

[3] Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011

[4] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8–20. https://doi.org/10.1109/36.898661
[5] Fielding, E. J., Blom, R. G., & Goldstein, R. M. (1998). Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. Geophysical Research Letters, 25(17), 3215–3218. https://doi.org/10.1029/98GL52260
[6] Funning, G. J., Parsons, B., Wright, T. J., Jackson, J. A., & Fielding, E. J. (2005). Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 110(B9), Article B09406. https://doi.org/10.1029/2004JB003338
[7] Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B7), 9183–9191. https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183
[8] Hanssen, R. F. (2001). Radar interferometry: Data interpretation and error analysis. Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9
[9] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. Geophysical Research Letters, 31(23), Article L23611. https://doi.org/10.1029/2004GL021737
[10] Lu, Z., & Dzurisin, D. (2014). InSAR imaging of Aleutian volcanoes: Monitoring a volcanic arc from space. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00348-6
[11] Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. Reviews of Geophysics, 36(4), 441–500. https://doi.org/10.1029/97RG03139
[12] Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. Nature, 364(6433), 138–142. https://doi.org/10.1038/364138a0
[13] Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of the IEEE, 88(3), 333–382. https://doi.org/10.1109/5.838084
[14] Samsonov, S., & Baryakh, A. (2020). Estimation of deformation intensity above a flooded potash mine near Berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR interferometry. Remote Sensing, 12(19), Article 3215. https://doi.org/10.3390/rs12193215
[15] Stramondo, S., Bozzano, F., Marra, F., Wegmuller, U., Cinti, F. R., Moro, M., & Saroli, M. (2008). Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. Remote Sensing of Environment, 112(6), 3160–3172. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.008
[16] Werner, C., Strozzi, T., & Wegmüller, U. (n.d.). Deformation time-series of the Lost-Hills oil field using a multi-baseline interferometric SAR inversion algorithm with finite-difference smoothing constraints [Poster]. GAMMA Remote Sensing. https://www.gamma-rs.ch/uploads/media/2012-1_Multi-Baseline_Time-Series.pdf
[17] Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(5), 950–959. https://doi.org/10.1109/36.175330

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Botirov, S. S., & Nomdorov, R. U. (2026). Kon hududlarida yer yuzasi deformatsiyalarini InSAR usullari bilan monitoring qilishning qiyosiy tahlili. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3-1). https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3-1.2026.33