

UO‘K: 528.8:528.481:622.1

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.20

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

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

RADAR INTERFEROMETRIYASI (INSAR) TEXNOLOGIYASINING NAZARIY ASOSLARI VA YER YUZASI DEFORMATSIYALARINI MONITORING QILISH IMKONIYATLARI



Botirov Shoxbos Soibjon o'g'li

Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti katta
o'qituvchisi, Termiz, O'zbekiston
E-mail: shoxbos.b@mail.ru
ORCID ID: 0009-0002-3045-4217



Nomdorov Rustam Uralovich

Qarshi davlat texnika universiteti "Geologiya va konchilik ishi"
kafedrası, t.f.f.d., dotsent, Qarshi, O'zbekiston
E-mail: rustamnmdorov@mail.ru
ORCID ID: 0009-0000-6987-8995

Annotatsiya. Mazkur maqolada radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasining nazariy asoslari, sintezlangan aperturali radar (SAR) tizimlarining ishlash prinsipi hamda yer yuzasi deformatsiyalarini masofadan monitoring qilish imkoniyatlari yoritilgan. Radiolokatsion signallarning amplituda va faza xususiyatlari asosida interferometrik tahlilni amalga oshirish, deformatsiyalarni millimetr aniqlikda baholash va geodinamik jarayonlarni kuzatish usullari bayon etilgan. Shuningdek, elektromagnit to'liqlarning X , C va L diapazonlari, ularning fizik xususiyatlari hamda monitoring aniqligiga ta'siri tahlil qilingan. D-InSAR usulining konchilik hududlari, seysmik faol zonalar va boshqa murakkab geologik sharoitlarda qo'llanish afzalliklari ko'rsatib berilgan. Maqolada interferometrik kuzatuvlarning ishonchligini ta'minlovchi asosiy omillar, jumladan, kogerentlik, raqamli balandlik modeli, takroriy suratga olish davriyligi va radar ma'lumotlarini qayta ishlash talablari yoritilgan. Olingan ilmiy xulosalar InSAR texnologiyasining marksheyderlik, geodeziya, geologiya hamda konchilik amaliyotida deformatsiyalarni erta aniqlash, xavfli hududlarni baholash va monitoring samaradorligini oshirishdagi muhim ahamiyatini asoslaydi. Tadqiqot natijalari zamonaviy masofadan zondlash texnologiyalarini rivojlantirish, geotexnik xavflarni kamaytirish va hududlar barqarorligini ta'minlash uchun nazariy hamda amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: radar interferometriyasi (InSAR), sintezlangan aperturali radar (SAR), D-InSAR, SBAS-InSAR, masofadan zondlash, yer yuzasi deformatsiyasi, geomexanik monitoring, geodinamik jarayonlar, C -diapazon, radar tasvirlari, deformatsiyalar monitoringi, geofazoviy tahlil, marksheyderlik, sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari, konchilik monitoringi.

Received: 20.07.2026

Accepted: 01.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ (INSAR) И ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ботиров Шохбос Соибжон угли

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

Номдоров Рустам Уралович

Доктор философии по техническим наукам, доцент, кафедра
«Геология и горное дело», Қаршинский государственный
технический университет, Қарши, Узбекистан

Аннотация. В данной статье рассмотрены теоретические основы технологии радиолокационной интерферометрии (InSAR), принцип функционирования систем радиолокации с синтезированной апертурой (SAR), а также возможности дистанционного мониторинга деформаций земной поверхности. Изложены методы интерферометрического анализа, основанные на амплитудных и фазовых характеристиках радиолокационных сигналов, позволяющие оценивать деформации с миллиметровой точностью и осуществлять мониторинг геодинамических процессов. Проанализированы особенности электромагнитных волн X-, C- и L-диапазонов, их физические свойства и влияние на точность мониторинга. Показаны преимущества применения метода D-InSAR при исследованиях горнодобывающих территорий, сейсмоактивных зон и других сложных геологических объектов. Рассмотрены основные факторы, обеспечивающие достоверность интерферометрических наблюдений, включая когерентность, цифровую модель рельефа, периодичность повторных съёмок и требования к обработке радиолокационных данных. Полученные научные результаты обосновывают значимость технологии InSAR для раннего выявления деформаций, оценки потенциально опасных участков и повышения эффективности мониторинга в маркшейдерии, геодезии, геологии и горном деле. Результаты исследования создают теоретическую и практическую основу для дальнейшего развития технологий дистанционного зондирования, снижения геотехнических рисков и обеспечения устойчивости территорий.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия (InSAR), радиолокация с синтезированной апертурой (SAR), D-InSAR, SBAS-InSAR, дистанционное зондирование, деформация земной поверхности, геомеханический мониторинг, геодинамические процессы, C-диапазон, радиолокационные изображения, мониторинг деформаций, геопространственный анализ, маркшейдерское дело, спутниковые данные, мониторинг горных работ.

THEORETICAL FOUNDATIONS OF INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (INSAR) TECHNOLOGY FOR GROUND SURFACE DEFORMATION MONITORING

Botirov Shoxbos Soibjon ugli

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

Nomdorov Rustam Uralovich

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

Abstract. This article presents the theoretical foundations of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology, the operating principles of Synthetic Aperture Radar (SAR) systems, and their capabilities for remote monitoring of ground surface deformation. Interferometric analysis methods based on the amplitude and phase characteristics of radar signals are described, enabling millimeter-level deformation measurements and continuous monitoring of geodynamic processes. The physical characteristics of electromagnetic waves in the X-, C-, and L-bands and their influence on monitoring accuracy are analyzed. The advantages of Differential InSAR (D-InSAR) for monitoring mining areas, seismically active regions, and other complex geological environments are discussed. The study also examines the key factors affecting the reliability of interferometric observations, including coherence, digital elevation models, repeat-pass acquisition intervals, and radar data processing requirements. The obtained results demonstrate the significance of InSAR technology for the early detection of ground deformation, assessment of hazardous areas, and improvement of monitoring efficiency in mine surveying, geodesy, geology, and mining engineering. The research findings provide a solid theoretical and practical basis for the further development of remote sensing technologies, mitigation of geotechnical hazards, and enhancement of territorial stability.

Keywords: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Synthetic Aperture Radar (SAR), D-InSAR, SBAS-InSAR, remote sensing, ground surface deformation, geomechanical monitoring,

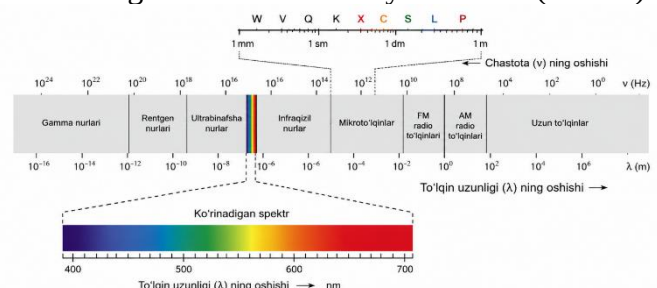
geodynamic processes, C-band, radar imagery, deformation monitoring, geospatial analysis, mine surveying, satellite data, mining monitoring.

Kirish. Radar interferometriyasining nazariy asosini sintezlangan aperturali radar (SAR) tizimlari yordamida olingan radiolokatsion tasvirlardan foydalanish tashkil etadi. Mazkur tizimlar sun'iy yo'ldoshlarga o'rnatilgan bo'lib, yer yuzasining bir xil uchastkasini takroriy suratga olish orqali interferometrik juftliklarni shakllantiradi. Ushbu tasvirlarning fazaviy farqini tahlil qilish natijasida relyefning geometrik xususiyatlari hamda vaqt davomida yuzaga kelgan deformatsiyalar aniqlanadi. Radiolokatsion zondlash usulining ishlash prinsipi elektromagnit to'lqinlarning yer yuzasi va undagi obyektlardan aks etish xususiyatiga asoslanadi. Radar antennasi tomonidan uzatilgan signal yer yuzasidan qaytgach qabul qilinadi va uning amplituda hamda faza parametrlarini tahlil qilish orqali kuzatilayotgan hududning fizik-geometrik tavsifi aniqlanadi [1].

Radiolokatsion texnologiyalarning shakllanishi elektromagnit to'lqinlar tabiatining o'rganilishi bilan uzviy bog'liqdir. XIX asr oxirida Heinrich Hertz elektromagnit to'lqinlarning mavjudligini tajribaviy jihatdan isbotlagan bo'lsa, keyinchalik 1904-yilda Christian Hülsmeyer radioto'lqinlarning aks etish hodisasidan foydalanib metall obyektlarni masofadan aniqlash usuliga patent olgan. Ushbu ishlanmalar radiolokatsion kuzatuv tizimlarining rivojlanishiga ilmiy asos yaratdi. Radiolokatsion texnologiyalarni amaliy jihatdan rivojlantirish ishlari XX asrning 30-yillari oxirida jadallashdi. Xususan, 1938-yilda Buyuk Britaniyada dastlabki radiolokatsion stansiyalar yaratildi va ularning takomillashishida Robert Watson-Watt muhim ilmiy-amaliy hissa qo'shdi. Ikkinchi jahon urushi davrida radar tizimlariga bo'lgan ehtiyojning ortishi ushbu texnologiyaning jadal rivojlanishiga turtki berdi hamda keyinchalik uning fuqaro sohasida ham keng qo'llanilishiga zamin yaratdi.

SAR tizimlarining chastota diapazonlari va ularning yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilishdagi imkoniyatlari. Radar interferometriyasi rivojlanishidagi muhim bosqichlardan biri 1991-yilda Yevropa kosmik agentligi (ESA) tomonidan ERS-1 sun'iy yo'ldoshining orbitaga chiqarilishi bilan bog'liq.

Mazkur apparat orqali olingan yuqori sifatli radiolokatsion tasvirlar interferometrik hisoblashlarning aniqligini sezilarli darajada oshirdi hamda yer yuzasi deformatsiyalarini muntazam monitoring qilish bo'yicha yangi ilmiy va amaliy imkoniyatlarni yaratdi. Bugungi kunda radiolokatsion ma'lumotlarni differensial interferometrik qayta ishlash (D-InSAR) yer yuzasi siljishlari va deformatsiyalarini aniqlashning eng samarali usullaridan biri sifatida e'tirof etiladi. Ushbu texnologiya turli davrlarda olingan SAR tasvirlarini o'zaro taqqoslash orqali deformatsiya maydonlarini millimetr darajasidagi aniqlikda aniqlash imkonini beradi. Shu sababli D-InSAR usuli konchilik hududlari, seysmik faol zonalar, vulqonlar va boshqa geodinamik obyektlarda monitoring olib borishda keng qo'llanilmoqda. Sintezlangan aperturali radar tizimlarida yer yuzasi cho'kishlarini aniqlash uchun, asosan, mikroto'lqin diapazonidagi elektromagnit nurlanishdan foydalaniladi (1-rasm).



1-rasm. Elektromagnit to'lqinlar umumiy spektrida mikroto'lqin diapazoni.

Radiolokatsion tizimlarda qo'llaniladigan tashuvchi chastota radar platformasining konstruktiv xususiyatlari hamda uning funksional vazifasiga bevosita bog'liq bo'lib, turli amaliy yo'nalishlarda turlicha diapazonlardan foydalaniladi [2].

Tashuvchi chastota qiymatiga qarab radar tizimlari bir necha chastota diapazonlariga ajratiladi va ularning asosiy texnik tavsiflari 1-jadvalda keltirilgan.

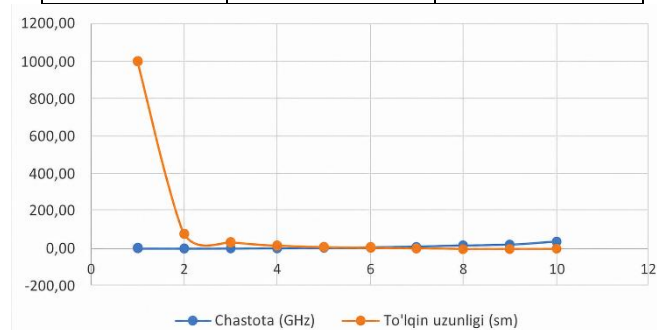
Hozirgi vaqtda sintezlangan aperturali radar (SAR) bilan jihozlangan sun'iy yo'ldosh tizimlarida, asosan, X-, C- va L-diapazonlari keng qo'llaniladi. Ushbu diapazonlarning har biri elektromagnit to'lqin uzunligi, fazaviy ajrata olish

qobiliyati, penetratsiya chuqurligi hamda kuzatuv sharoitlariga moslashuv darajasi bilan o'zaro farqlanadi. Shu sababli ularning tanlanishi kuzatuv obyektining turi va tadqiqot maqsadidan kelib chiqib amalga oshiriladi. SAR tizimlarining muhim afzalliklaridan biri mikroto'lqin diapazonidagi elektromagnit nurlanishdan foydalanishidir. Mazkur to'lqinlar bulut qoplami, tuman va yog'ingarchilik orqali yuqori darajada tarqalish xususiyatiga ega bo'lib, ob-havo sharoitidan deyarli mustaqil ravishda radiolokatsion kuzatuvlarni amalga oshirish imkonini beradi [3-4]. Elektromagnit to'lqinlarning atmosfera qatlamidan o'tish samaradorligi, avvalo, ularning to'lqin uzunligi bilan belgilanadi. Shu sababli turli chastota diapazonlari geologik, geodezik va geodinamik monitoring vazifalarini bajarishda o'ziga xos afzalliklarga ega hisoblanadi. [5-6].

1-jadval

**Radiolokatsion tizimlarda qo'llaniladigan
chastota diapazonlari**

Diapazon nomi	Chastota	To'lqin uzunligi
VHF	30–300 MHz	10–1 m
P-band	280–390 MHz	107–77 sm
UHF	300 MHz – 1 GHz	100–30 sm
L-band	1–2 GHz	30–15 sm
S-band	2–4 GHz	15–7.5 sm
C-band	4–8 GHz	7.5–3.75 sm
X-band	8–12.5 GHz	3.75–2.40 sm
Ku-band	8–12.5 GHz	2.40–1.67 sm
K-band	18–25 GHz	1.67–1.18 sm
Ka-band	25–40 GHz	1.18–0.75 sm



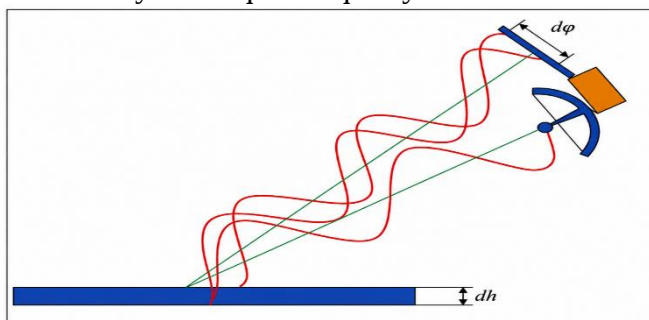
**2-rasm. Radiolokatsion tizimlarda qo'llaniladigan
chastota diapazonlari.**

Elektromagnit to'lqinlarning atmosfera qatlamidan o'tish qobiliyati, avvalo, ularning to'lqin uzunligi bilan belgilanadi. To'lqin uzunligi 2 sm dan ortiq bo'lgan radiosignallar bulut qatlamlari orqali sezilarli so'nishsiz tarqala oladi, 3–4 sm va undan uzun to'lqinlar esa yomg'ir tomchilari mavjud sharoitlarda ham yuqori darajada o'tuvchanlikni saqlab qoladi. To'lqin uzunligi radiolokatsion

signalning aks etish intensivligi hamda yer yuzasidan orqaga sochiluvchi elektromagnit nurlanishning xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli turli chastota diapazonlari kuzatilayotgan obyektlarning geometrik o'lchami, fizik xususiyatlari va sirt tuzilishiga qarab turlicha axborot beradi. L-diapazon (15,0–30,0 sm) uzun to'lqinli radiolokatsion nurlanishdan foydalanishi sababli, asosan, yirik o'lchamdagi obyektlardan kuchli qaytuvchi signal hosil qiladi. Bundan tashqari, ushbu diapazondagi elektromagnit to'lqinlar o'simlik va qor qoplami orqali qisman o'tish, ayrim geologik sharoitlarda esa qum hamda tuproq qatlamlariga ma'lum darajada kirib borish xususiyatiga ega. Shu sababli L-diapazon geologik tuzilishni o'rganish va o'simlik bilan qoplangan hududlarni kuzatishda samarali hisoblanadi. C-diapazon (3,8–7,5 sm) va X-diapazon (2,4–3,8 sm) esa qisqaroq to'lqin uzunligiga ega bo'lib, yer yuzasidagi kichik o'lchamli obyektlarni yuqori fazoviy aniqlik bilan ajratish imkonini beradi. Ushbu diapazonlarda radiolokatsion signal o'simlik, qor va tuproq sirtidan nisbatan kuchli aks etadi, bu esa yer yuzasining mayda tafsilotlarini aniqlashda muhim afzallik hisoblanadi.

Umuman olganda, elektromagnit to'lqin uzunligi ortishi bilan uning turli muhitlarga kirib borish qobiliyati ham ortadi. Aksincha, qisqa to'lqin diapazonlari atmosfera ta'siri, ayniqsa suv bug'i va yog'ingarchilikka nisbatan sezgirroq bo'ladi. Shu sababli radar diapazonini tanlash kuzatuv maqsadi, tabiiy-geografik sharoit hamda talab etiladigan aniqlik darajasini hisobga olgan holda amalga oshiriladi. Radar interferometriyasida deformatsiyalarni aniqlash aniqligi qo'llanilayotgan elektromagnit to'lqin uzunligiga ham bevosita bog'liqdir. Interferometrik fazani to'g'ri talqin qilish uchun qo'shni kuzatuvlar orasidagi qiya masofa bo'yicha yuzaga kelgan siljish qiymati, odatda, ishlatilayotgan to'lqin uzunligining yarmidan oshmasligi lozim. Ushbu shart bajarilganda fazaviy noaniqliklar kamayadi va yer yuzasi siljishlarini yuqori aniqlik bilan baholash imkoniyati yaratiladi. Yer yuzasi cho'kishlarini aniqlashning interferometrik prinsipi bir xil hududni turli vaqtlarda radiolokatsion suratga olish natijasida olingan signallarning fazaviy farqini tahlil qilishga asoslanadi (3-rasm). Interferogrammada hosil bo'lgan faza farqi yer yuzasida sodir bo'lgan

deformatsiyalar haqida miqdoriy axborot beradi.



3-rasm. Nuqtada vertikal siljishlarni ajratib ko'rsatish prinsipi.

Natijalar. Olib borilgan tadqiqotlar natijasida radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasi yer yuzasi deformatsiyalarini masofadan turib yuqori aniqlikda monitoring qilish imkoniyatiga ega bo'lgan eng samarali geofazoviy usullardan biri ekanligi ilmiy jihatdan asoslandi. Tadqiqot davomida SAR tizimlarining ishlash prinsipi, elektromagnit to'liqlarning X-, C- va L-diapazonlari hamda ularning deformatsiyalarni aniqlash aniqligiga ta'siri kompleks ravishda tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, C-diapazonli Sentinel-1 sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari millimetr darajasidagi deformatsiyalarni aniqlash imkonini beradi va konchilik hududlarida geodinamik jarayonlarni kuzatish uchun eng maqbul manbalardan biri hisoblanadi.

Tahlillar natijasida elektromagnit to'liq uzunligi ortishi bilan uning turli muhitlarga kirib borish qobiliyati ortishi, ammo fazoviy ajrata olish qobiliyati nisbatan kamayishi aniqlandi. Aksincha, X-diapazon yuqori fazoviy aniqlikni ta'minlasa-da, atmosfera va namlik ta'siriga sezgirligi yuqoriroq ekanligi kuzatildi. Shu sababli geodezik monitoring vazifalarida radar diapazonini tanlash tadqiqot obyektining tabiiy-geografik sharoiti hamda kuzatilayotgan deformatsiya xarakteridan kelib chiqib amalga oshirilishi lozim.

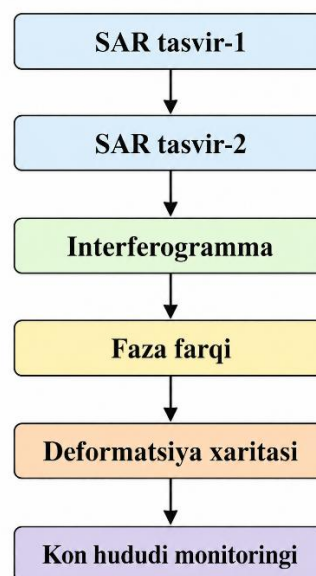
1-jadval

Radar diapazonlarining asosiy xususiyatlari va InSAR texnologiyasida qo'llash samaradorligi

Radar diapazoni	To'liq uzunligi (sm)	Penetratsiya	Fazoviy aniqlik	InSAR uchun mosligi
X-band	2.4-3.8	Past	Juda yuqori	80%
C-band	3.8-7.5	O'rtacha	Yuqori	100%
L-band	15-30	Juda yuqori	O'rtacha	90%

Interferometrik tahlilning nazariy asoslari

shuni ko'rsatdiki, fazoviy noaniqliklarning oldini olish uchun kuzatilayotgan siljish miqdori qo'llanilayotgan elektromagnit to'liq uzunligining yarmidan oshmasligi zarur. Mazkur shart bajarilganda interferogrammalarni dekodlash sifati oshadi hamda deformatsiyalarni yuqori aniqlik bilan aniqlash imkoniyati yaratiladi.



4-rasm. InSAR texnologiyasida deformatsiyalarni aniqlashning umumiy algoritmi.

Xulosa. O'tkazilgan tahlillar radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasi yer yuzasi deformatsiyalarini masofadan monitoring qilishning yuqori aniqlik va ishonchlilikka ega zamonaviy geofazoviy usullaridan biri ekanligini ko'rsatdi. Sintezlangan aperturali radar (SAR) ma'lumotlari asosida interferometrik tahlilni qo'llash yer yuzasidagi millimetr darajasidagi siljish va cho'kishlarni aniqlash, ularning fazoviy-vaqt bo'yicha rivojlanish dinamikasini baholash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, radar diapazonini tanlash kuzatuv obyektining xususiyati, tabiiy-geografik sharoit va talab etiladigan aniqlik darajasiga bevosita bog'liq. X-, C- va L-diapazonlari turli geologik hamda geodinamik sharoitlarda o'ziga xos afzalliklarga ega bo'lib, ayniqsa C-diapazonli SAR ma'lumotlari yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilishda yuqori samaradorlikni ta'minlaydi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications. John Wiley & Sons.
- [2] Dhont, D., Chorowicz, J., & Cadet, J. (2003). Detection of compression structures from SAR ERS imagery: Examples of the central Japan seismic area. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 559–571.
- [3] Botirov, S. S., Nomdorov, R. U., & Abdisamatov, B. A. (2026). Sentinel-1 tasvirlari yordamida yer osti konchilik faoliyati natijasida yuzaga kelgan yer yuzasi deformatsiyasini insar usuli orqali monitoring qilish. *Sanoatda Raqamli Texnologiyalar*, 4(1), 69-74. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.1.2026.22>
- [4] Боти́ров, Ш. С., & Номдо́ров, Р. У. (2025). Мониторинг деформаций земной поверхности, вызванных подземными горными работами на месторождении хондиза, на основе технологии insar и спутниковых изображений SENTINEL-1. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 3(3), 88-93. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.3.3.2025.30>
- [5] Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. Institution of Mining and Metallurgy.
- [6] Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., & Wiesmann, A. (2003). Deformatsiyani xaritalash uchun interferometrik nuqtaviy nishonlar tahlili. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 7, 4362–4364.

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

Botirov, S. S. o'g'li, & Nomdorov, R. U. (2026). Radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasining nazariy asoslari va yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilish imkoniyatlari. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.20>
