

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

"Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті"
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау - кен металлургия институты

Маркшейдерлік іс және геодезия кафедрасы

Бергенғалиев Акежан Бериктасович

Радарлық интерферометрия әдістерінің негізінде қозғалыстардың қауіпті учаскелерінің
карталарын құру

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7М07306 – Геокеңістіктік цифрлық инженерия

Алматы 2025

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

«Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

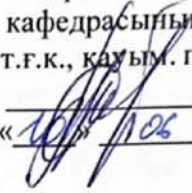
Ө.А Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

Маркшейдерлік іс және геодезия кафедрасы

7M07306 – Геокеңістіктік цифрлық инженерия

БЕКІТЕМІН

«Маркшейдерлік іс және геодезия»
кафедрасының меңгерушісі
т.ғ.к., қауым. профессор

Мейрамбек Г.
«» 2025 ж.

**Магистрлік диссертацияны орындауға арналған
ТАПСЫРМА**

Магистрант: Бергенғалиев Акежан Бериктасович

Тақырыбы: Радарлық интерферометрия әдістерінің негізінде қозғалыстардың қауіпті
учаскелерінің карталарын құру

Академиялық мәселелер жөніндегі проректор 04.12.2023 жылы №548 -П/Ө бұйрығымен бекітілген
Аяқталған диссертацияны тапсыру мерзімі: « 19 » маусым 2025ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері: бастапқы түсірілім және зерттеу нәтижелері

Магистрлік диссертацияда қарастырылатын сұрақтар тізімі:

а) InSAR және DInSAR технологияларының жұмыс принциптері мен ерекшеліктері

ә) Геоқауіпті аумақтарды бағалау мен картаға түсіруде радарлық интерферометрияның рөлі

б) Қауіпті аумақтар бойынша алынған деректерді визуализациялау

Графикалық материалдар тізімі (міндетті сызбаларды дәл көрсете отырып):

Жұмыс презентациясы слайдтарда 15 көрсетілген

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер:

1. Нурпеисова М.Б., Омиржанова Ж.Т., Картбаева К.Т., Геодезические наблюдения на
Алматинском геодинамическом полигоне//«Горный вестник Узбекистана», Ташкент, ТашГТУ,
2018, С.63-74, ISSN 2181-7383

2. Нурпеисова М.Б., Картбаева К.Т., Анализ и интерпретация данных геодинамического
мониторинга // Вестник КазГАСА, №4(74), 2019, С.302-308. ISSN 1680-080X

3. Alkhasov A.B. Геоэкология нефтяных месторождений. – Москва: Недра, 2005.

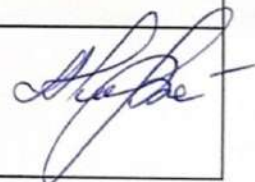
4. Сейітов Қ.К. Мұнай кен орындарын игеру кезінде экологиялық қауіпсіздік. – Атырау: Х.
Досмұхамедов ат. АМУ, 2020

5. Геодезические методы изучения деформаций земной поверхности на геодинамических
полигонах (методическое руководство). –М.: ЦНИИГиК, 1985.-25с.

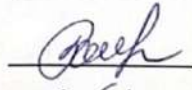
Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлім атауы, қарастырылған мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге ұсыну мерзімдері	Ескерту
Кенқияқ кен орнының жалпы сипаттамасы және зерттеу аумағының тектоникалық ерекшеліктері	10.01.2025 ж	—
Радарлық интерферометрия және оның геодезиялық мониторингте қолданылуы	03.03.2025 ж	—
Кенқияқ кен орнындағы қауіпті аймақтарды анықтау және картографиялау	12.05.2025 ж	—

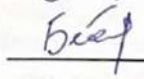
Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердің жұмыстарын көрсетумен, кеңесшілер мен норма бақылаушының қойған қолдары

Бөлімдердің атаулары	Консультанттар, аты-жөні (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Кенқияқ кен орнының жалпы сипаттамасы және зерттеу аумағының тектоникалық ерекшеліктері	Байгурин Ж.Д. т.ғ.д., профессор	10.01.2025	
Радарлық интерферометрия және оның геодезиялық мониторингте қолданылуы	Байгурин Ж.Д. т.ғ.д., профессор	03.03.2025	
Кенқияқ кен орнындағы қауіпті аймақтарды анықтау және картографиялау	Байгурин Ж.Д. т.ғ.д., профессор	12.05.2025	
Норма бақылаушы	Айтказинова Ш.К. PhD., қауымдастырылған профессор	23.06.25	

Ғылыми жетекшісі

 Байгурин Ж.Д.

Білім алушы тапсырманы орындауға алды

 Бергенгалиев А.Б.

Күні

«19» 10 2023 ж.

АНДАТПА

Бұл магистрлік диссертациялық жұмыста Кеңияқ кен орны аумағындағы жер қыртысының қозғалысын бағалау және геодинамикалық қауіпті аймақтарды анықтау мақсатында радарлық интерферометрия әдістерін қолдану мәселесі қарастырылады. Қазіргі таңда пайдалы қазбаларды өндіру аймақтарында туындайтын техногендік жүктемелер жер бедерінің тұрақтылығына тікелей әсер етеді. Соның салдарынан пайда болатын жер бетіндегі микросмещенциялар мен деформацияларды ерте кезеңде анықтау – нысандардың қауіпсіздігін қамтамасыз етудің маңызды шарты болып табылады.

Жұмыста қашықтықтан зондтаудың заманауи әдістерінің бірі – интерферометриялық синтетикалық апертуралы радар (InSAR) технологиясы қолданылды. Sentinel-1 спутниктерінің деректері негізінде Кеңияқ кен орнының 2020–2024 жылдар аралығындағы жер қыртысының қозғалыс динамикасы зерттеліп, қауіпті аумақтар карталары құрастырылды. Геодинамикалық деформациялардың кеңістіктік таралуы мен жылдамдық векторлары сандық және графикалық түрде талданды. Жұмыстың нәтижелері Кеңияқ кен орнына тән геодинамикалық қауіп-қатерлерді бағалау мен болжауға, сондай-ақ геодезиялық мониторинг жүйесін жетілдіруге ғылыми және практикалық тұрғыда үлес қоса алады.

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской диссертационной работе рассматривается применение метода радарной интерферометрии с целью оценки движений земной коры и выявления геодинамически опасных зон на территории Кенкиякского месторождения. В условиях интенсивной разработки месторождений полезных ископаемых техногенные нагрузки оказывают прямое влияние на устойчивость земной поверхности. Возникающие в результате этого микросмещения и деформации требуют раннего выявления, что является важным условием обеспечения безопасности инженерных объектов.

В исследовании использована одна из современных технологий дистанционного зондирования – интерферометрия с синтезированной апертурой радара (InSAR). На основе спутниковых данных Sentinel-1 за период 2020–2024 гг. проанализирована динамика движения земной коры в районе Кенкиякского месторождения, а также составлены карты потенциально опасных участков. Пространственное распределение геодинамических деформаций и векторы скоростей смещений проанализированы в цифровом и графическом форматах. Полученные результаты вносят научный и практический вклад в оценку и прогнозирование геодинамических рисков, характерных для Кенкиякского месторождения, а также в совершенствование систем геодезического мониторинга.

ANNOTATION

This master's thesis investigates the application of radar interferometry methods for assessing crustal movements and identifying geodynamically hazardous areas within the Kenkiyak oil field. In regions of intensive mineral extraction, increasing anthropogenic loads directly affect the stability of the Earth's surface. As a result, early detection of surface micro-displacements and deformations becomes a critical factor in ensuring the safety and integrity of engineering structures.

The study employs one of the advanced remote sensing techniques – Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). Based on Sentinel-1 satellite data from 2020 to 2024, the dynamic movement of the Earth's crust in the Kenkiyak area was analyzed, and hazard zone maps were generated. The spatial distribution of geodynamic deformations and displacement velocity vectors was examined using both numerical and graphical methods.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Кеңқияқ кен орнының жалпы сипаттамасы	9
1.1 Кеңқияқ кен орнының географиялық және геологиялық сипаттамасы	9
1.2 Радарлық интерферометрияның жалпы қағидалары	11
1.3 Интерферометриялық өңдеу үдерісі	15
Бірінші тарау бойынша тұжырым	19
2 Радарлық интерферометрия және оның геодезиялық мониторингте қолданылуы	20
2.1 Қашықтықтан зондтау деректерін қолдану арқылы қауіпті аймақтарды анықтау	20
2.2 Интерферометриялық SAR (InSAR) әдісінің математикалық негіздері	22
2.3 Радарлық интерферометрия деректерін өңдеудегі шектеулер мен дәлдік мәселелері	24
Екінші тарау бойынша тұжырым	26
3 Кеңқияқ кен орнындағы қауіпті аймақтарды анықтау және картографиялау	28
3.1 Жер бетіндегі вертикальды және горизонтальды қозғалыстардың кеңістіктік динамикасы	28
3.2 Геодинамикалық қауіп карталарын құрастыру және талдау	30
3.3 Жер қыртысы қозғалыстарының қауіптілік деңгейлерін саралау және картографиялық визуализациялау	36
Үшінші тарау бойынша тұжырым	42
Қорытынды	43
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	44
А қосымшасы	46

Қысқартулар	Толық жазылуы
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
DInSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
SAR	Synthetic Aperture Radar
DEM	Digital Elevation Model
GPS	Global Positioning System
GIS	Geographic Information System
GCP	Ground Control Point
SBAS	Small Baseline Subset Interferometry
PS-InSAR	Persistent Scatterer Interferometry
WRF	Weather Research and Forecasting model

Осы жұмыста келесі терминдер мен анықтамалар қолданылады

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) – Жер бетінің вертикаль бағыттағы деформациясын радарлық спутниктік суреттер арасындағы интерференциялық айырмашылық арқылы анықтайтын қашықтықтан зондтау әдісі.

DInSAR (Differential InSAR) – Уақыт бойынша әртүрлі кезеңде түсірілген радар суреттерінің айырмашылығын есептеу арқылы жер бетінің шөгу немесе көтерілу өзгерістерін жоғары дәлдікпен анықтайтын әдіс.

SAR (Synthetic Aperture Radar) – Синтетикалық апертуралы радар, бұл жер серігінен немесе ұшақтан белсенді радиосигналдар жіберу арқылы Жер бетін суретке түсіретін жүйе.

DEM (Digital Elevation Model) – Жер бетінің биіктіктерін цифрлық түрде сипаттайтын модель. Бұл модель жердің рельефін үшөлшемді бейнелеуге мүмкіндік береді.

GPS (Global Positioning System) – Жердегі объектілердің нақты координаталарын анықтайтын жаһандық навигациялық спутниктік жүйе.

GIS (Geographic Information System) – Географиялық деректерді жинау, сақтау, өңдеу, талдау және визуализациялауға арналған ақпараттық жүйе.

GCP (Ground Control Point) – Спутниктік немесе әуе суреттерін дәл географиялық координаталармен байластыру үшін қолданылатын жер бетіндегі нақты тірек нүктелері.

SBAS (Small Baseline Subset Interferometry) – InSAR әдісінің бір түрі, шөгу процестерін зерттеу үшін қысқа базалық интервалмен алынған радар суреттерін қолданып жоғары дәлдікті талдау жасау әдісі.

PS-InSAR (Persistent Scatterer InSAR) – Уақыт бойынша тұрақты радиосигнал шағылыстыратын нүктелер арқылы деформацияны жоғары дәлдікпен бағалауға мүмкіндік беретін InSAR технологиясының түрі.

WRF (Weather Research and Forecasting model) – Ауа райын зерттеу және болжауға арналған нумерикалық модель, атмосфералық жағдайларға байланысты жерсеріктік мәліметтерді интерпретациялау кезінде қолданылады.

КІРІСПЕ

Зерттелетін тақырыптың өзектілігі. Қазіргі таңда пайдалы қазбаларды өндіру аймақтарындағы техногендік жүктемелердің қарқынды өсуі жер қыртысының тұрақтылығына айтарлықтай әсер етуде. Бұл жағдай инженерлік инфрақұрылымдарға қауіп төндіріп, жер бетінің шөгінділері мен деформацияларын ерте кезеңде анықтау қажеттілігін туындатады. Радарлық интерферометрия әдістерін қолдану арқылы кең ауқымды аймақтардағы микроскопиялық қозғалыстарды дәл анықтау геодинамикалық қауіп-қатерлердің алдын алу және бақылау жүйесін жетілдіруге мүмкіндік береді [1]. Кеңқияқ кен орны – геологиялық құрылымы күрделі, техногендік әсерге ұшыраған маңызды өндірістік нысан, сондықтан бұл аймақтағы геодинамикалық жағдайды зерттеу – айрықша өзекті ғылыми әрі практикалық міндет болып табылады [3].

Жұмыстың мақсаты. Кеңқияқ кен орны аумағындағы жер қыртысының қозғалысын бағалау және геодинамикалық қауіпті аймақтарды анықтау үшін радарлық интерферометрия (InSAR) әдісін қолдану арқылы кеңістіктік талдау жүргізу және қауіптілік карталарын құрастыру.

Жұмыстың негізгі міндеттері:

- Зерттеу үшін Sentinel-1 спутниктік деректерін жинау және өңдеу;
- Интерферометриялық SAR (InSAR) әдісінің негізінде вертикальды және горизонтальды қозғалыстарды есептеу;
- Қозғалыстардың қауіпті шектерін бағалау және қауіптілік деңгейлері бойынша сараптау;
- Қауіпті аймақтардың геоақпараттық жүйеде визуализациясын және картографиясын жасау;

Зерттеу нысаны: Кеңқияқ мұнай кен орнының аумағындағы жер қыртысының қозғалыс динамикасы және техногендік әсерге ұшыраған геоаумақтар.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы: Бұл зерттеудің нәтижелері геодинамикалық қауіпті аймақтарды нақты анықтауға және пайдалы қазбаларды өндіру кезінде туындайтын деформация процестерін тиімді бақылауға мүмкіндік береді. InSAR әдісі негізіндегі мониторинг жүйесі геодезиялық бақылауды жетілдіріп, нысандардың қауіпсіздігін қамтамасыз етуге септігін тигізеді. Сонымен қатар, алынған карталар мен мәліметтер болашақ инженерлік жобаларда шешім қабылдауға негіз бола алады.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы.

Қозғалыс жылдамдығы мен векторларының карталары жасалып, аймақтық геодинамикалық мониторинг жүйесінің негізі қаланды

Жұмыстың құрылымы мен көлемі: Диссертациялық жұмыс кіріспеден, 3 тараудан, қорытындыдан және 39 пайдаланылған әдебиеттер тізімінен, 50 беттен, 28 суреттен және 2 кестеден тұрады.

1 Кеңқияқ кен орнының жалпы сипаттамасы және зерттеу аумағының тектоникалық ерекшеліктері

1.1 Кеңқияқ кен орнының географиялық және геологиялық сипаттамасы

Кеңқияқ мұнай кен орны Қазақстан Республикасының Ақтөбе облысы, Темір ауданы аумағында 1-суретке сәйкес орналасқан. Ол Ақтөбе қаласынан оңтүстікке қарай 220 шақырым, Темір қаласынан 70 шақырым қашықтықта орналасқан. Ең жақын елді мекендерге Кеңқияқ және Саркөл ауылдары жатады. Тұз үсті мұнайлы құрылымның жалпы ауданы 2673,8 гектарды немесе 27,27 км² құрайды.

Аймақ геоморфологиялық жағынан жазық, жартылай шөлейтті белдеуде орналасқан. Жер бедері теңіз деңгейінен 170–230 метр биіктікте жатқан жазық және аласа қыратты болып келеді. Климаттық жағдайлары күрт континенттік сипатта: жазы ыстық және құрғақ, қысы суық. Жылдық жауын-шашын мөлшері шамамен 250 мм-ді құрайды.

Кеңқияқ құрылымы алғаш 1932 жылы анықталып, мұнай-газ әлеуетін бағалау мақсатында 1956 жылы алғашқы геологиялық барлау жұмыстары басталған. 1959 жылы төменгі триас (К-34 ұңғымасы) және орта юра (К-17 ұңғымасы) шөгінділерінен алғашқы мұнай ағыны алынған. 1961 жылға дейін жүргізілген іздестіру-бұрғылау нәтижесінде барлығы 42 барлау ұңғымасы, 1 параметрлік ұңғыма және 21 құрылымдық-іздеу ұңғымасы бұрғыланған.



1 - сурет – Зерттеліп отырған Кеңқияқ кен орнының орналасу картасы

Орта юра кезеңінің шөгінділерінде мұнайлы қатпардың өлшемі 8,5 × 4,5 км. Қатпардың солтүстік қанаты салыстырмалы түрде жайпақ болып, 2°–4°

бұрышпен еңістелсе, оңтүстік қанатында еңіс бұрышы шығысында 2° – 3° , ал батысында 7° -ға дейін артады.

Қатпар ортасындағы грабен аймағының түсу амплитудасы 50 метрге дейін жетеді. Бұл грабенді шектейтін лықсымалар көптеген ұңғымалардың қималарынан айқын көрінеді. Лықсыма жазықтықтары бір-біріне қарама-қарсы 45° – 50° бұрышпен еңістелген және кейбіреулері триас шөгінділеріне дейін жетеді. Солтүстік лықсыма оңтүстік шеттегі грабенмен қосылып, орта юра шөгінділерінің шекарасын құрайды.

Оңтүстік қанатта грабенге жақын орналасқан кіші көлденең лықсымалар байқалады, олар изогипстер арқылы айқындалады. Мұндай лықсымалардың амплитудасы 3-5 м, ал ұзындығы бірнеше жүз метрге дейін жетеді. Сонымен қатар, аз амплитудалы қабат ажыраулары грабен ішінде және солтүстік қанатта да кездеседі. Алайда олардың шағын амплитудасы бұл құрылымдардың мұнай өндіру үдерісіне айтарлықтай кедергі келтірмейтінін көрсетеді.

Кен орны тұзасты және тұзүсті мұнайлы-газды кешендермен байланысқан көпқабатты құрылым болып табылады. Мұнайлы қабаттар артин-сакмар, асель және кунгур ярустарының терригенді шөгінділерінде, сондай-ақ төменгі пермь мен ортаңғы карбонның карбонаттарында (КТ-I және КТ-II) орналасқан. Бұл қабаттар ашық қуыстылығы 9 -18%, өткізгіштігі 10^{-12} м² шамасында, мұнаймен қанығу дәрежесі 65-88%-ке дейін жететін жақсы коллекторлармен сипатталады.

Кенқияқ көтерілімі субмеридиандық бағытта $9,3 \times 5,4$ км аумақты алып жатыр, оның амплитудасы 250 м-ге дейін жетеді. Геологиялық құрылым постседиментациялық және унаследованный сипатта, яғни ежелгі шөгінділердің беткейлік көтерілуі нәтижесінде қалыптасқан.

Кенқияқ кен орны бірнеше өнімді горизонттан тұрады. Артин және сакмар қабаттарында мұнайдың дебиті $3,5 - 120$ м³/тәулік аралығында, КТ-II карбонаттарында – 120 м³/тәулікке дейін жетеді. Қабаттық қысым $51,6 - 80$ МПа, қабат температурасы $87 - 90^{\circ}\text{C}$. Кен орнындағы мұнайдың физико-химиялық қасиеттері жеңіл, метан-нафтен негізінде, тығыздығы $804 - 886$ кг/м³ аралығында.

Кен орны хлор-кальций типіндегі минералдануы жоғары ($119 - 204$ г/л) пласт суларымен сипатталады. Бұл суларда йод, бром, литий, бор сияқты элементтер өнеркәсіптік концентрацияда кездеседі. Су көздерінің газбен қанығу деңгейі $1400 - 9000$ см³/л аралығында. Бұл көрсеткіштер қабаттық судың мұнаймен өзара әрекеттескенін және жоғары энергетикалық режимін көрсетеді.

Кенқияқ мұнай кен орны – Прикаспий ойпатының шығыс жиегіндегі тұзасты мұнай қорының алғашқы әрі ең ірі ашылымы. Ол қазақстандық мұнай барлау тарихында стратегиялық мәнге ие нысан болып есептеледі. Кен орнының күрделі геологиялық құрылымы, мұнайдың әртүрлі терригенді және карбонатты қабаттарда орналасуы, жоғары өндірістік дебиттер мен ұзақмерзімді игеру перспективалары оны Ақтөбе облысының және бүкіл Қазақстанның мұнай өнеркәсібі үшін ерекше маңызды етеді.

Кеңқияқ кен орнының геологиялық құрылымында палеозой – пермь, мезозой – триас, юра, бор және кайнозой – төрттік жастағы шөгінді жыныстар қатысады.

Кеңқияқ кен орнының тұз үсті шөгінділері таралу жағдайларына байланысты екі учаскеге бөлінеді: Негізгі аймақ және Тік еңіс аймағы. Жалпы алғанда, кен орындағы тұз үсті мұнай кешенінің ауданы 2673,8 гектар (немесе 27,27 км²).

Ұңғымаларды бұрғылау және сынау нәтижесінде Негізгі аймақта келесі өнімді горизонттар анықталған:

- Төменгі бор жыныстарында – Баррем және готерив жыныстары;
- Орта юра жыныстарында – J2-I, J2-II, J2-III горизонттары;
- Төменгі триас жыныстарында – T1-I және T1-II горизонттары;
- Жоғарғы пермь жыныстарында – P2t горизонты.

Тік еңіс аймағында төменгі триас жыныстарында конгломерат горизонты, ал жоғарғы пермь шөгінділерінде III – XI горизонттары анықталған.

Кеңқияқ свитасы 1932 жылы ашылғанымен, барлау жұмыстары 1956 жылы басталып, алғашқы мұнай ағыны 1959 жылы алынған. Бұл нәтиже төменгі триас жыныстарындағы К-34 ұңғымасы мен орта юра қабатындағы №К-17 ұңғымасынан тіркелген. 1959–1961 жылдары аралығында 42 барлау, 1 параметрлік және 21 құрылымдық-барлау ұңғымалары бұрғыланды. Нәтижесінде мұнай жоғарғы пермь, төменгі триас, орта юра және бор жыныстарынан табылды.

1956 жылдың қазан айында Кеңқияқ көтерілімінде құрылымдық және барлау бұрғылауы басталды. К-17, К-27, К-34 ұңғымаларын бұрғылау кезінде юра және төменгі триас дәуірінің мұнаймен қаныққан құмдары мен құмтастары ашылды. Кейінгі жылдардағы зерттеулер нәтижесінде тек тұз үсті кешені ғана емес, тереңірек жатқан тұзасты шөгінділердің де мұнайлы екені дәлелденді.

Бұрғылау барысында алынған керн үлгілерінің негізінде кен орнындағы мұнай қоры есептеліп, 1962 жылы бұл есептеулер КСРО Мемлекеттік қорлар комитеті тарапынан А + В + С1 + С2 санаттары бойынша 110,9 млн тонна көлемінде бекітілді.

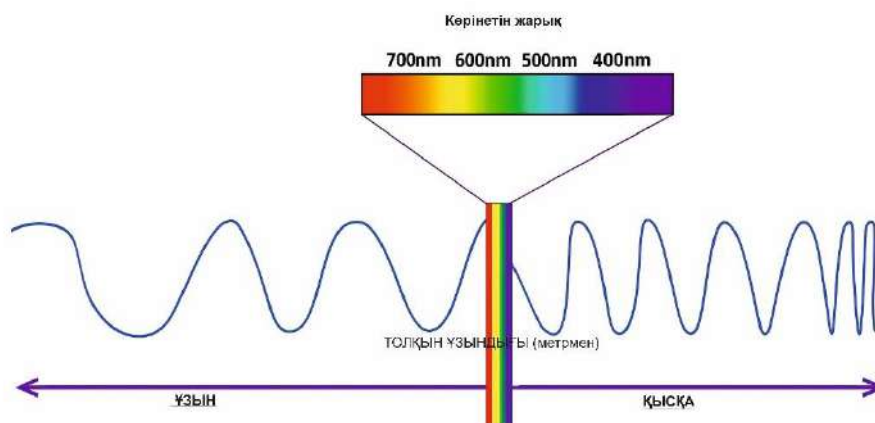
1966 жылы «Эмбанефть» бірлестігінің бұйрығымен «Кеңқияқнефть» мұнай-газ өндіру басқармасы (НПУ) құрылды. 1997 жылдан бастап Қытайдың Ұлттық Мұнай Компаниясы CNPC бұл кен орнының 60% акциясын сатып алып, кейін ол CNPC-Ақтөбемұнайгаз АҚ деп атала бастады.

1.2 Радарлық интерферометрияның жалпы қағидалары

Радар – қозғалмалы нысандарды және олардың диапазондық бағыттағы жылдамдығын анықтау үшін микротолқынды сигнал қолданатын белсенді сенсорлық жүйе. Синтезделген апертуралы радар (SAR) – бұл ұзын антенна

эффектісін сандық сигналды өңдеу арқылы қалыптастыратын арнайы радар түрі.

Микротолқындар – толқын ұзындығы шамамен 1 миллиметрден 1 метрге дейінгі аралықтағы электромагниттік толқындар. SAR жүйесі осы микротолқын диапазонын пайдаланады. 2-суретке сәйкес Электромагниттік спектрдің жалпы көрінісі көрсетілген.



2 - сурет – Электромагниттік спектрдің диаграммасы

Осы зерттеу аясында SAR жүйесі – жер бетіне электромагниттік толқындарды бағыттап, қайтарылған сигналдарды қабылдау арқылы кескін жасайтын белсенді радарлық жүйе ретінде қарастырылады.

SAR жүйесінің басты артықшылықтары:

- Күн сәулесіне тәуелсіз, яғни күндіз де, түнде де жұмыс істей алады;
- Бұлт пен тұман арқылы жұмыс істейді, сондықтан барлық ауа райында түсірілім жасай алады.

1-кестеге сәйкес SAR жүйелері К-дан Р-диапазонына дейінгі микротолқындарды қолданады. Бұл диапазонның ерекшеліктері:

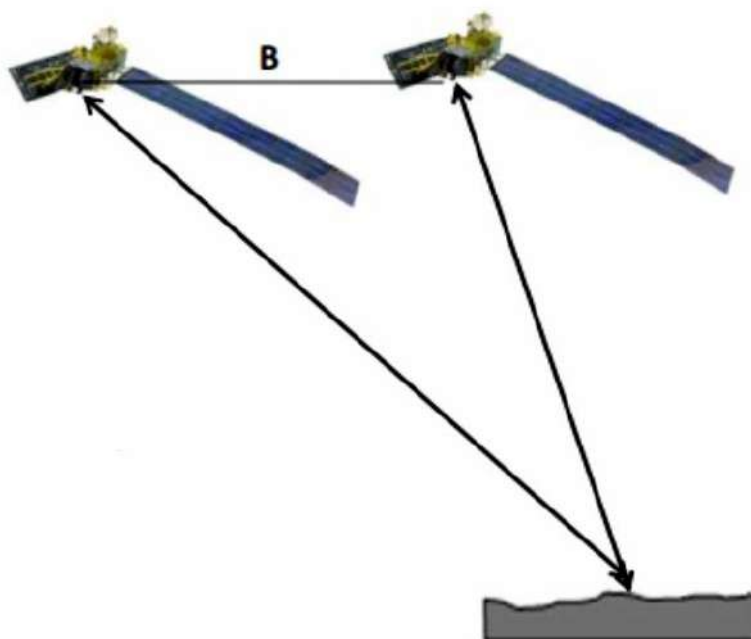
Кесте 1 – SAR-да қолданылатын микротолқын диапазоны

Диапазон	Ерекшелігі
К-диапазоны	Толқын ұзындығы жауын тамшыларына (әсіресе тропиктерде) ұқсас, сондықтан ауа райына сезімтал.
Р-диапазоны	Ұзын толқындылығы бар, бірақ ионосфера арқылы өтуде кешігуге ұшырайды.
Х, С, L-диапазондары	Көбінесе жерсеріктік SAR жүйелерінде қолданылады. Олар ауа райынан аз әсер алады.

Радарлық интерферометрия кемінде екі радарлық суретті қажет етеді. Бұл суреттерді алудың екі негізгі әдісі бар: қайта өтумен түсіру (repeat-pass) және бір өтумен түсіру (single-pass). Repeat-pass әдісінде бір антенна бір аймақты бірнеше уақыт аралығында қайта түсіреді. Single-pass әдісінде ұшақ немесе ғарыш аппаратына орнатылған екі бөлек антенна бір уақытта сурет

түсіреді. Бұл әдісте 3-суретке сәйкес бір антенна сигнал жібереді және қабылдайды, ал екінші антенна тек қабылдаушы ретінде жұмыс істейді.

Repeat-pass SAR интерферометриясында бір аймақтың екі суреті екі түрлі орбитадан алынады, мұнда орбиталардың аз ғана ығысуы интерферометриялық негіз (baseline B) құрайды. Мұндай жүйеге ENVISAT ASAR, ERS-1, ERS-2 SAR, ALOS PALSAR және RADARSAT спутниктері жатады.



3 - сурет – SAR интерферометрі бір аймақты екі мәрте суретке түсіру сәті

2-суреттегі геодезиялық ақпарат жер бедері туралы мәліметті екі SAR суретінің фазалық айырмашылығы арқылы шығаруға мүмкіндік береді. Repeat-pass InSAR геометриясының схемасы 4-суретке сәйкес көрсетілген. S1 және S2 екі ракурстан алынған суреттер, биіктігі H және жер бетіндегі түсіру нүктесіне R1 және R2 қашықтықтары арқылы белгіленеді. Радар антеннасының бақылау бұрышы – θ , ал B база арқылы көрсетілген бұрыш альфа. $B \perp$ - екі сурет арасындағы тік база. Рашшырым нүктесінің биіктігі мен тригонометриялық теоремдерді қолдану арқылы есептеуге болады:

$$h = H - R1 * \cos(\theta) \quad (1)$$

Фаза айырмашылығы мен InSAR түсіру геометриясы арасындағы байланысты түсіну үшін, S1 және S2 позицияларынан жер бетін сол аумақты бақылауды қарастырайық.

A нүктесі R1 (қиғаш қашықтық) және R2 арқылы екі рет бақыланады. Радиосигналдың қайтып келуіндегі қашықтық айырмашылығы 2δ , ал фазалық айырмашылық (интерферограмма) келесідей анықталады:

$$\varphi = \frac{-4\pi\delta}{\lambda} \quad (2)$$

немесе толқынның қосарланған айырмашылығына эквивалентті:

$$\gamma = 2\pi \text{ (радар толқынының ұзындығында } \delta \text{)}$$

SAR жүйесі нүктеден қайтқан сигналдың амплитудасы мен фазасын кешенді мән ретінде тіркейді. Сондықтан S_1 және S_2 келесідей экспоненциалды түрде өрнектеледі:

$$S_1 = |a_1| \exp(jb_1), S_2 = |a_2| \exp(jb_2) \quad (3)$$

Интерферограммада S_2 мен S_1 арасындағы фазалық айырма интерференциялық үлгі ретінде бейнеленіп, салыстырмалы геометрия жөніндегі барлық ақпаратты қамтиды. Ол келесі түрде есептеледі:

$$S_1 * S_2 = |a_1| * |a_2| * \exp[j(b_1 - b_2)] \quad (4)$$

мұндағы фазалық компоненттер:

$$b_1 = -\frac{2\pi}{\lambda} (2R_1 + \Phi_{scattering}) \quad (5)$$

$$b_2 = -\frac{2\pi}{\lambda} (2R_2 + \Phi_{scattering}) \quad (6)$$

мұндағы және – екі суреттегі шашырау фазалары. Егер S_1 мен S_2 жоғары когеренттілікке ие болса, онда бұл фазалар өзара ұқсас деп есептеледі.

Сонда фазалық айырма былайша жазылады:

$$\varphi = b_1 - b_2 = -\frac{4\pi(R_1 - R_2)}{\lambda} = \frac{-4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (7)$$

4 - суретке сәйкес үшбұрышының S_1 – S_2 – A геометриясынан косинус теоремасы бойынша δ келесі түрде жазылады:

R_1 – радиолокациялық көлбеу қашықтық,

B – база ұзындығы,

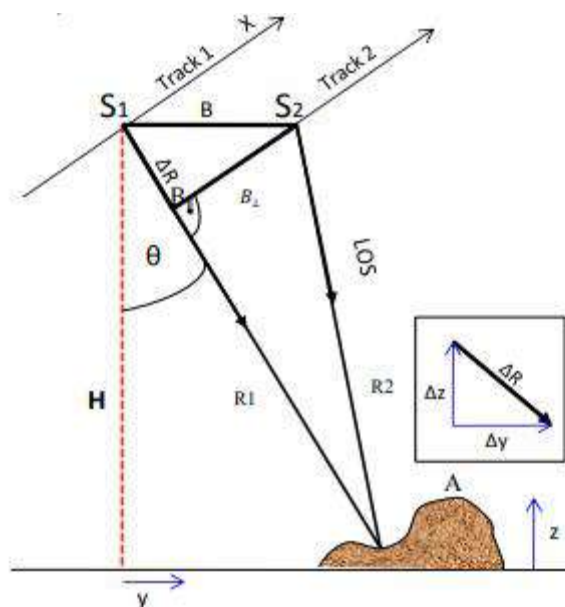
α – базаның сенсор горизонтальмен бұрышы,

θ – антенна бұрышы.

$R_1 \approx R_2$ деп алсақ, косинус ережесі:

$$(\Delta R)^2 = B^2 + R^2 - 2BR \cos(90^\circ - \alpha + \theta) \quad (8)$$

Осылайша, интерферометриялық фазаны $\text{mod } 2\pi$ белгісіздігін жою үшін "unwrap" (фазаны тарқату) қажет, себебі бұл цифрлық биіктік моделі (ЦБМ, DEM) деректерін алу үшін маңызды.



4 - сурет – Қиылысу бағыты бойынша SAR интерферометриясының геометриясы

Егер интерферограмма идеалды түрде $\text{mod } 2\pi$ болса, онда фазаны тарқату кеңістіктік болжау әдістері арқылы дәл жүзеге асады. Алайда, декорреляцияның әртүрлі факторлары SAR интерферограммаларының жиі шуылға ұшырайтынын көрсетеді. Мұндай жағдайда фазаны тарқату – күрделі және дұрыс анықталмаған мәселе (ill-posed problem) болып табылады.

Шулы (strepitous) интерферограммаларды тарқатуға арналған бірнеше кеңінен қолданылатын әдістер бар және олардың әрқайсысының артықшылықтары мен шектеулері бар. Алайда, одан да тиімді әдістерді іздеу жалғасуда. Сонымен қатар, фазалық интерферограммада қосымша түзетулер де қажет: Жер шарының қисықтығынан пайда болатын "ramp" (фазалық еңіс) артефактілерді жою; Спутниктік орбиталар арасындағы бұрыштық айырмашылықтардан туындайтын бұрмалауларды жою. Бұл екі жол (орбита) жиі нақты параллель емес, сондықтан фазада жүйелік еңіс пайда болады.

1.3 Интерферометриялық өңдеу үдерісі

Радарлық интерферометрия алғаш рет топографиялық картографиялау үшін 1947 жылы Грэм тарапынан ұсынылған [17]. Осы бағытта көптеген ғылыми мақалалар жарық көрді, әсіресе Еуропалық Ғарыш Агенттігі 1991 жылдың шілдесінде ERS-1 C-диапазонды спутнигін ұшырғаннан кейін. SAR интерферометриясының теориясы мен қолданылуы кеңінен зерттелді. Дифференциалдық синтетикалық апертуралы радар интерферометриясы (DInSAR) – бұл радар интерферометриясының тік бағыттағы ұсақ деформацияларды өлшеуге бейімделген нұсқасы. Оның теориялық негізі 1989 жылы сипатталған. DInSAR әдісі тау-кен өндірісі саласындағы шөгү

мониторингі, мұздықтардың қозғалысын бақылау, жер сілкіністері мен жанартау белсенділігін зерттеу сияқты бағыттарда сәтті қолданылып келеді. Сонымен қатар, бұл әдіс қала аумағындағы жер шөгуін бақылауда да кеңінен қолданылады, себебі мұндай шөгулер құрылыс пен инфрақұрылым дамуына қауіп төндіреді.

Осы зерттеудің мақсаты – антропогенді әсерінен туындаған жер шөгуі мен сырғымаларды DInSAR әдісі арқылы өлшеу. Жер шөгу картасы деректері негізінде DInSAR арқылы жасалды, ал сырғыма картасы спутниктік мәліметтері негізінде дайындалды. Сонымен қатар, сырғыманы тудыратын факторларды бағалаудың қарапайым әдісі әзірленіп, осы зерттеуде қолданылды. Бұл тәсіл зерттеу және апаттың алдын алу аймақтарында жер шөгуі мен сырғыма қауіп-қатер карталарын жасауға мүмкіндік береді. Интерферометриялық жұп екі радар суретін қолдану арқылы жасалады. Жақсы нәтиже алу үшін кеңістіктік және уақыттық интервал қысқа болғаны дұрыс, сондай-ақ фазалық шу деңгейі төмен болуы қажет. Жаңбырдан кейін түсірілген суреттерді қолданудан алынды, себебі ылғалдылықтың өзгеруі жер бетінің диэлектрлік қасиеттеріне әсер етеді. SAR суреттер арасындағы фазалық айырмашылықты дәл өлшеу үшін master және slave суреттері бір-бірімен субпиксельдік дәлдікпен сәйкестендірілуі тиіс.

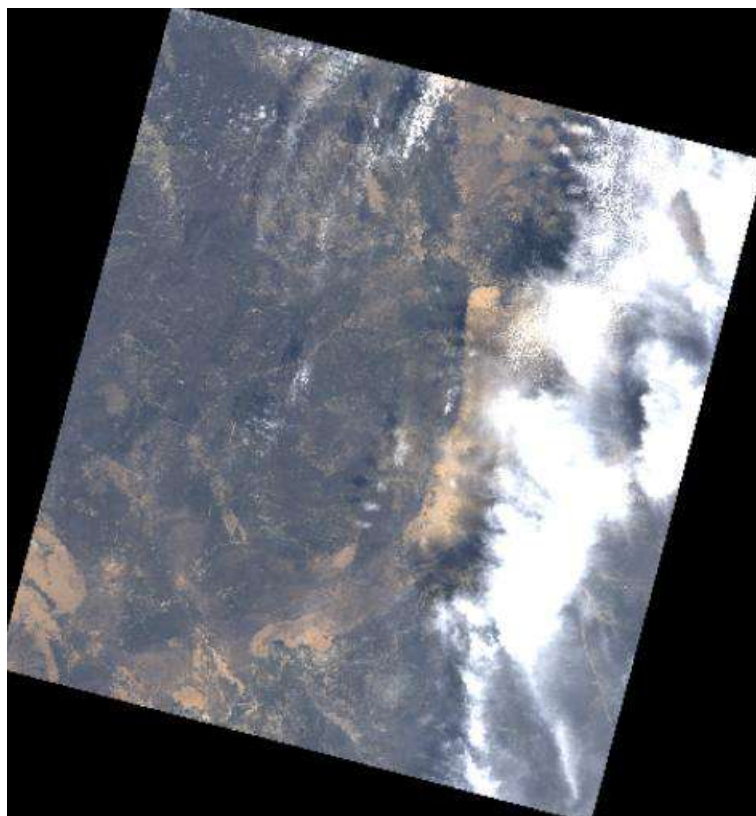
Бұл үшін үш негізгі кезең қолданылады: геометриялық айырмашылықтарды бағалау, slave суретті master геометриясына қайта үлгілеу және геометриялық айырмашылықты модельдеу. Интерферограмма екі тураланған SAR сурет негізінде жасалады. Фазалық интерферограмма master және conjugate-slave суреттердің күрделі көбейтіндісі арқылы есептеледі. Complex multilooking әдісі көрші пикселдер бойынша орташа мән алу арқылы сигнал/шум қатынасын жақсартады. Бұл фильтрация соңғы пикселдің квадрат пішінді болуына және интерферограмма сапасының артуына мүмкіндік береді. Параллель френдждер интерферограммада жер бетінің биіктігі тұрақты екенін көрсетеді, олар көбінесе flat earth fringes деп аталады.

Когеренттілік – пиксел ішіндегі шағылысу нүктелеріне қатысты бағаланатын тағы бір шамалық көрсеткіш [12], [13]. Бұл көрсеткіш интерферометриялық сигналдарды өңдеудің көптеген кезеңдерінде қолданылады және жергілікті интерферограмманың сапасын сандық түрде бағалау үшін қажет.

Когеренттілік фазасы (γ) 9 тендеуі арқылы есептеледі және ол екі SAR суретінің күрделі корреляция коэффициенті болып табылады:

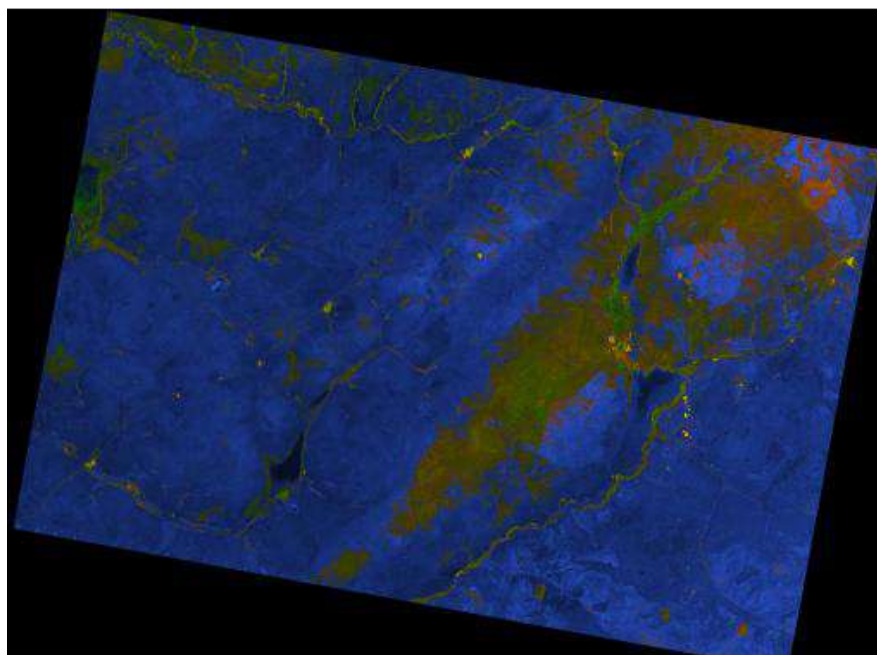
$$\gamma = \left\{ \frac{E[S_1 \cdot S_2]}{\sqrt{E[|S_1|^2] \cdot E[|S_2|^2]}} \right\} \quad (9)$$

5 - суретке сәйкес SAR суреттер жұбына сәйкес когеренттілік кескіні 6-суретте көрсетілген.



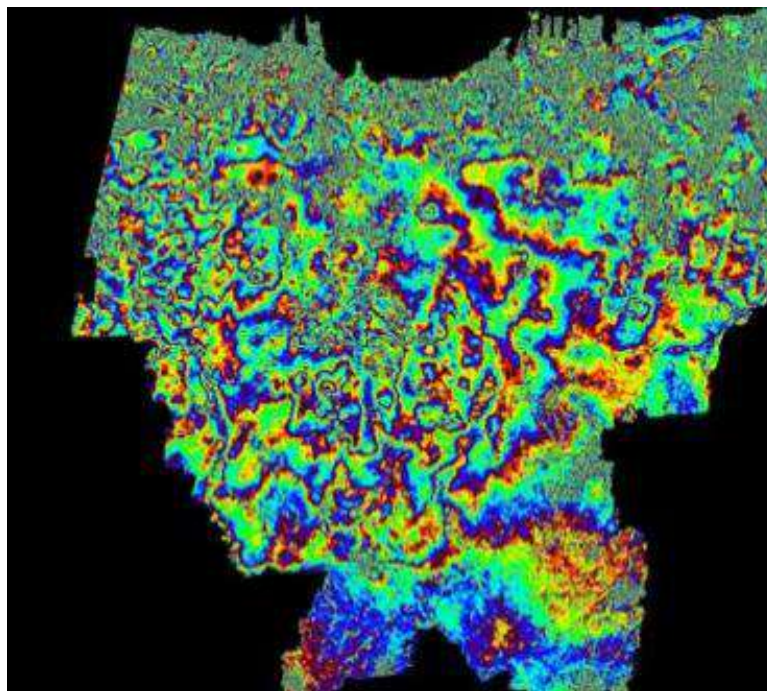
5 - сурет – Кеңқияқ ауданы бойынша SAR деректерінің интенсивтілік кескіні

InSAR жүйесінің геометриясына байланысты интерферограммада диапазон бағыты бойынша фазалық ауытқу байқалады. Бұл құбылыс “flatearth fringes” (жер қисығы френдждері) деп аталады.



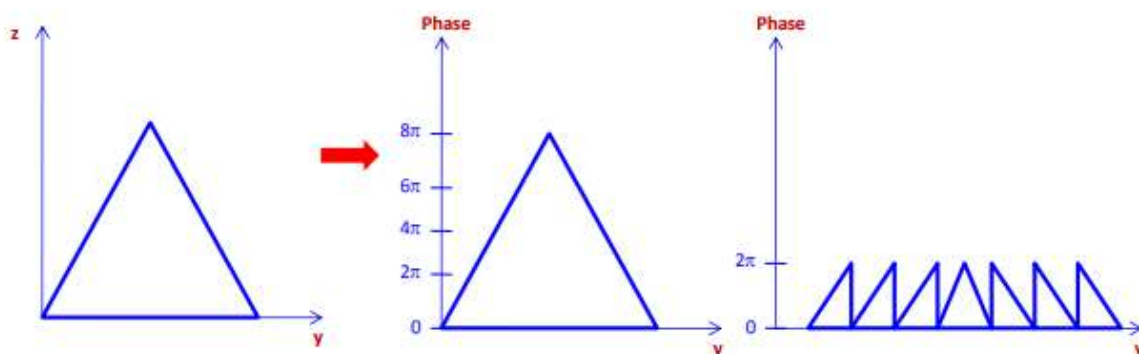
6 - сурет – Қисық жер френдждері бар интерферограмма көлбеу диапазон бағытында

Оларды жою интерферометриялық өңдеудің алдын ала кезеңдерінің бірі болып табылады. Бұл фаза трендтері интерферограммадан шегеріледі, нәтижесінде “түзетілген” (flattened) интерферограмма алынады.



7 - сурет – Түзетілген интерферограмма

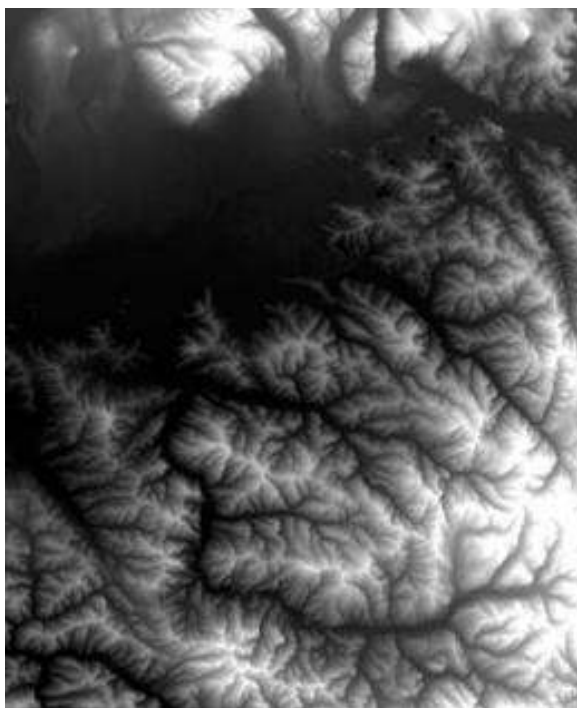
Flattened интерферограмманың мысалы 8-суретке сәйкес көрсетілген (5-суреттегі бастапқы интерферограммаға негізделген).



8 - сурет – Фазаны тарқату процесі

Жер бедерінің биіктігін немесе деформациясын есептеу үшін интерферограммадағы әрбір пикселдің толық фазалық мәні анықталуы қажет.

Фазаны тарқату әдісі ретінде Goldstein және Werner ұсынған Branch–Cut алгоритмі мен path-following әдістері қолданыла алады. 5-суреттегі интерферограммаға қолданылған фазаны тарқату нәтижесі 9-суретте көрсетілген.



9 - сурет – $\text{mod } 2\pi$ белгісіздігінен босатылғаннан кейінгі радарлық сурет

Бірінші тарау бойынша қорытынды

Бұл тарауда зерттеудің нысаны ретінде таңдалған Кенқияқ мұнай кен орнының аумақтық орналасуы, геоморфологиялық және геодинамикалық жағдайлары қарастырылып, радарлық интерферометрияны қолдану қажеттілігі негізделді. Зерттеу аймағының табиғи-климаттық ерекшеліктері, бұрын жүргізілген геологиялық-геофизикалық жұмыстар нәтижелері және аймақтағы деформациялық процестерге ықпал ететін факторлар сарапталды.

Тараудың негізгі мақсаты – Кенқияқ кен орнындағы геодинамикалық процестерді ғарыштық радарлық интерферометрия әдістері арқылы зерттеуге теориялық-методологиялық негіз дайындау және радар деректерінің маңыздылығын дәлелдеу болды. Бұл үшін Sentinel-1 спутнигі арқылы алынған радарлық деректерді қолданудың ғылыми-тәжірибелік негіздері қарастырылып, интерферометриялық талдаудың кезеңдері сипатталды: когеренттілікті бағалау, фазаны тарқату, қисық Жер әсерін жою, сондай-ақ мұнай кен орындарындағы деформацияларды бақылауға арналған DInSAR технологиясының тиімділігі көрсетілді.

Нәтижесінде, Кенқияқ кен орнындағы жер қыртысы қозғалыстарын анықтау үшін радарлық интерферометрияның жоғары дәлдікті әрі жүйелі әдіс екендігі дәлелденіп, болашақта қауіп карталарын құруға, инженерлік қорғау шараларын жоспарлауға және мұнай өндірудің геодинамикалық қауіпсіздігін қамтамасыз етуге негіз қаланды.

2 Радарлық интерферометрия және оның геодезиялық мониторингте қолданылуы

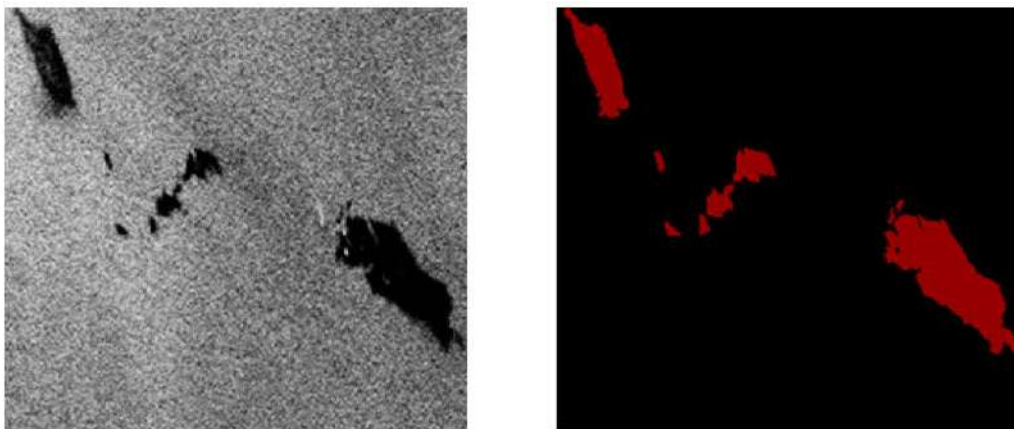
2.1 Қашықтықтан зондтау деректерін қолдану арқылы қауіпті аймақтарды анықтау

Мұнай кен орындарын игеру кезінде, яғни қойнау қабаттарынан көмірсутектерді айдап шығару үдерісі жер бетінің деформацияларына әкеліп соғуы мүмкін. Қабат қысымының төмендеуі нәтижесінде коллектор жыныстары тығыздалып, олардың үстіндегі жер қыртысы біртіндеп шөге бастайды [2]. Мұндай шөгулердің жылдық жылдамдығы 10-суретке сәйкес көбінесе бірнеше миллиметрден сантиметрге дейін ғана жеткенімен, уақыт өте келе олардың жинақталуы мұнай инфрақұрылымына – ғимараттардың іргетасының отыруы немесе құбыр жүйелерінің майысуы сияқты қауіптер төндіруі мүмкін [7], [8], [9]. Сондықтан жер бетіндегі өзгерістерді үнемі геодезиялық бақылауда ұстау қажеттілігі туындайды.



10 - сурет – Мұнай өндіру аумағы

Дәстүрлі геодезиялық әдістер – 11-суретке сәйкес нивелирлеу, спутниктік GPS/GNSS-мониторинг – жоғары дәлдікке ие болғанымен, кең ауқымды немесе шалғай орналасқан өндірістік аймақтарды толық және жедел қамти алмайды [25]. Мұндай жағдайда тиімді шешім ретінде спутниктік радарлық интерферометрия (InSAR) қолданылады. Бұл әдіс спутниктен алынған бір аумақтың қайталама суреттері арасындағы радиолокациялық сигналдардың фазалық айырмашылығын өлшеу арқылы жер бетіндегі өте ұсақ деформацияларды (бірнеше миллиметрге дейін) анықтауға мүмкіндік береді. Қазіргі заманда кеңінен қолданылатын көпөткін (multi-temporal) интерферометриялық әдістер (мысалы, Persistent Scatterer Interferometry немесе SBAS) жердің уақыт бойынша шөгу/көтерілу серпінін анықтап, деформация жылдамдығы карталарын құруға мүмкіндік береді.



11 - сурет – Сегменттелген жағалау аймағы (DNN әдісі)

InSAR әдісін мұнай өндіру аймақтарында қолдану арқылы максималды шөгу мен көтерілу аймақтарын анықтап, оларды ұңғымалардың орналасуымен және техногендік белсенділікпен салыстыруға болады. Мәселен, белсенді өндіру жүріп жатқан қойнау қабаттарының үстіндегі аумақтарда айтарлықтай шөгу байқалса, ал флюидтер айдалып жатқан қысымдық ұңғымалар жанында жердің сәл көтерілуі тіркелуі мүмкін. Осылайша, InSAR әдісі арқылы кеңістіктегі деформациялардың толық көрінісі алынып, олардың уақыт бойынша динамикасын үздіксіз бақылауға болады.

InSAR әдісін қолданудың басты артықшылықтарының бірі – жер бетінің қозғалыстарының қауіп-қатер карталарын құру мүмкіндігі. Анықталған деформация өрістері негізінде аумақ топырақ қозғалысының жылдамдығына байланысты зоналарға бөлінеді. Бұл процесс нәтижесінде скважиналарға, құбыр желілеріне, резервуарларға және басқа да инфрақұрылымдық нысандарға қауіп төндіретін шөгу немесе көтерілу жылдамдығы жоғары аймақтар бөлініп көрсетіледі. Мұндай қауіпті аймақтар арнайы карталарда белгіленіп, олар негізінде мониторингті күшейту немесе инженерлік алдын алу шараларын қолдану қажеттігі анықталады. Мысалы, шөгу жылдамдығы жоғары аудандарда жердің тұрақтылығын арттыру, өндіру қарқынын реттеу немесе құрылымдарды күшейту секілді шараларды уақытылы жоспарлауға болады.

InSAR мәліметтері негізінде жасалған деформация карталары геотехникалық қауіп-қатерлердің алдын алуда маңызды құралға айналууда. InSAR спутниктік жүйелері (мысалы, Sentinel-1) миллиметрлік дәлдікпен деформацияларды анықтай алады. Бұл мәліметтер дәстүрлі геодезиялық өлшеулермен (нивелирлеу, GNSS) салыстырылып, жоғары сәйкестік көрсетеді. Атмосфералық және орбиталық қателіктерді ескеріп, дұрыс калибрлеу жүргізілсе, айырмашылықтар бірнеше миллиметрден аспайды. Сонымен қатар, InSAR кеңістікті үздіксіз қамту арқылы нүктелік өлшеулерді толықтырып, дәстүрлі геодезиялық әдістермен кешенді түрде қолдануға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе ірі және алыс орналасқан мұнай кен орындарын бақылау кезінде аса маңызды, өйткені кешенді геодезиялық мониторинг

көмегімен жердің шөгуін уактылы анықтап, мұнай инфрақұрылымының қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз етуге болады.

2.2 Интерферометриялық SAR (InSAR) әдісінің математикалық негіздері

Фазаның интерферограммадағы үзілу орындарының белгісіздігімен байланысты шешімнің көпмәнділігін жоюдың жалпы тәсілі – барлық қолжетімді ақпаратты ескере отырып, ықтимал шешімдер жиыны бойынша ықтималдық (немесе сенімділік дәрежесі) таралуын құру болып табылады.

Жазық цифрлық интерферограммада бір-біріне перпендикуляр екі бағытқа сәйкес келетін екі абсолюттік фазалық айырмадан құралған вектор абсолюттік фазаның градиенті деп аталады. Фаза үзілістерінің орналасу ықтималдығын анықтау міндеті абсолюттік фазаның градиентінің ықтималдық таралуын құру есебіне келіп тіреледі [14].

Бұл зерттеудің мақсаты – радиолокациялық топографиялық интерферограммадағы абсолюттік фаза градиентінің математикалық моделін әзірлеу және осы модельге негізделген, барлық қолжетімді қосымша ақпаратты ескеретін фазаны тарқату әдісін жасау.

Мәселенің қойылымы. Жазықтықта фазаны тарқату есебінің жалпыланған тұжырымы келесідей түрде болады:

$$\Phi[s(x, y), a(x, y)] \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$[s(x, y) + a(x, y)] = \vec{0}, \quad (11)$$

$$(x, y) = W[\nabla \varphi(x, y)], \psi(x, y) = s(x, y) + a(x, y), \quad (12)$$

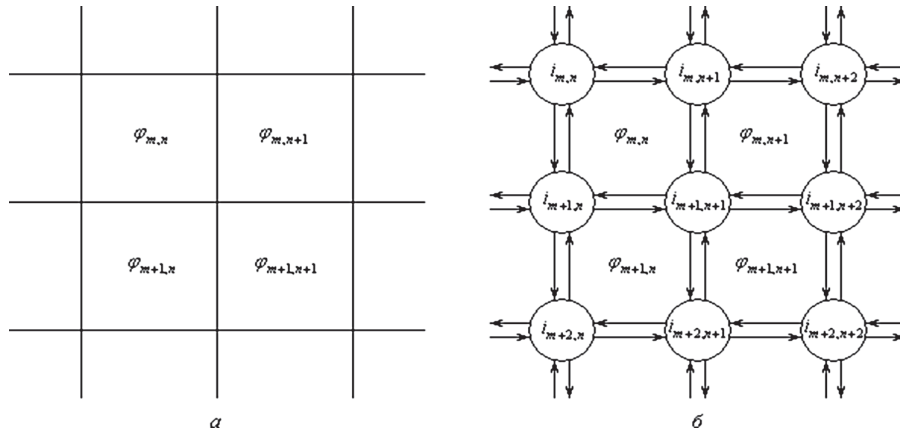
$$(x, y) \in \Omega \subset \mathbb{R}^2, \quad (13)$$

Егер интерферограмма сандық түрде берілсе, онда жоғарыда көрсетілген есептің қойылымы көлік желілерінің теориясы (transport network theory) терминдерінде сипатталуы мүмкін. Бұл жағдайда интерферограммаға сәйкес бағытталған байланысқан граф $G=(V,E)$ салынады, мұндағы:

- V – түйіндер жиыны,
- E – доғалар жиыны,

Және 12-суретке сәйкес бұл граф декарттық координаттар жүйесіндегі бүтін сандар торына сәйкес келеді.

Интерферограммадағы әрбір төрт іргелес пиксель графтың белгілі бір түйініне сәйкестендіріледі, ал әрбір екі көршілес пиксель – карама-қарсы бағытталған доғалардың жұбына.

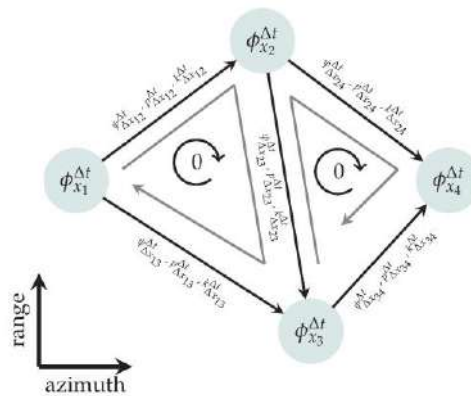


12 - сурет – Фазаның басты мәнінің матрицасы (интерферограмма) (а) және оған сәйкес бағытталған граф (б)

MCF алгоритмі – бұл бір интерферограмма үшін фаза ашу (unwrap) мәселесін шешуге арналған тармақталу (branching) негізіндегі алгоритм [10], [11]. Алгоритм тек қана когерентті пикселдерді пайдаланады, бұл интерферограммадағы шуды азайтуға мүмкіндік береді. Когерентті пикселдер – бұл когеренттілік мәндері негізінде анықталатын, тұрақты қайтарымды шашырау сипаттамалары бар пикселдер [16].

$\mathcal{M}$ жиынындағы m когерентті пикселдер негізінде, азимут/қашықтық жазықтығында Делоне триангуляциясы жүргізіледі, ол $\mathcal{N}$ жиынындағы n кеңістіктік доғалар мен $\mathcal{R}$ жиынындағы r үшбұрыштарды құрайды. 13-суретке сәйкес $m = 4$ пиксел, $n = 5$ доға және $r = 2$ үшбұрыштан тұратын шағын мысал келтірілген. Әрбір доға бойымен оралған (wrapped) фаза градиенті $\psi^{\Delta t \alpha \beta}(\Delta x k l)$ есептеледі. MCF тәсілі бойынша, оралған фаза градиенті ашылған (unwrapped) градиенттен белгісіз 2π еселігіне айырмашылықпен ерекшеленеді формулаға сәйкес.

$$\begin{aligned} \phi_{\Delta x 12}^{\Delta t \alpha \beta} + \phi_{\Delta x 23}^{\Delta t \alpha \beta} + \phi_{\Delta x 31}^{\Delta t \alpha \beta} &= 0 \phi_{\{\Delta x 12\}}^{\{\Delta t \alpha \beta\}} + \phi_{\{\Delta x 23\}}^{\{\Delta t \alpha \beta\}} + \phi_{\{\Delta x 31\}}^{\{\Delta t \alpha \beta\}} = \\ 0 \phi_{\Delta x 12}^{\Delta t \alpha \beta} + \phi_{\Delta x 23}^{\Delta t \alpha \beta} + \phi_{\Delta x 31}^{\Delta t \alpha \beta} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$



13 - сурет – Төрт пиксельден тұратын мысал үшін Делоне кеңістіктік триангуляциясы

2.3 Радарлық интерферометрия деректерін өңдеудегі шектеулер мен дәлдік мәселелері

InSAR өлшемдеріне тропосфераның ықпалы. Жерсеріктік радарлық интерферометрия (InSAR) деректері атмосферадағы өзгерістерге өте сезімтал: әсіресе тропосферадағы ылғал мен қысым ауытқулары радар сигналына қосымша фазалық кешігулер енгізеді [35]. Бұл «атмосфералық шу» жер бетіндегі шөгу тәрізді деформация сигналдарын бүркемелеп, өлшеу дәлдігін төмендетеді. Мысалы, ауаның салыстырмалы ылғалдылығы 20%-ға өзгерсе, интерферограммадағы деформация мәніне шамамен 10 см қате қосылуы мүмкін. Жалпы, тропосфераның кеңістіктік-уақыттық өзгермелілігі Sentinel-1 секілді жерсерік миссияларының үлкен аумақты қамтитын InSAR өлшемдерінің нақтылығын шектейді. Ионосфераның да әсері бар, бірақ С-диапазонды Sentinel-1 радары үшін ол әдетте мардымсыз (ұзақ базалық интерферограммаларда немесе геомагниттік дауыл жағдайларын қоспағанда).

Дәл жергілікті деформацияны анықтау үшін атмосфера әсерін түзету өте маңызды. Біріншіден, көпуақыттық (time-series) InSAR өңдеу алгоритмдері әр интерферограммадағы ұзақ толқынды атмосфералық әсерлерді уақыт бойынша фильтрациялау арқылы әлсіретеді. Мысалы, тұрақты шашыратқыштар әдісі (PSInSAR) не stacking (жиынтықтау) әдістері ондаған интерферограмма фазаларын орташа алу арқылы атмосфераның кездейсоқ әсерін $\sim 1/\sqrt{N}$ есе азайтады, яғни 100 интерферограмма біріктірілсе атмосфералық қатенің амплитудасы шамамен 10 есе кемиді. Бұл тәсіл жердің баяу шөгу жылдамдығын анықтағанда сигнал-шум қатынасын арттырып, миллиметрлік өзгерістерді сенімді ажыратуға көмектеседі. Екіншіден, сыртқы деректерге негізделген модельдік түзетулер қолданылады: жаһандық ауа-райы модельдері (мыс., ERA-Interim) немесе зениттік кешігу мәндері (ZTD) интерферограммаларға енгізіліп, әр түсірілім сайын тропосфера әсерін жояды. Дегенмен, стандартты модельдердің кеңістіктік шешімі шектеулі болғандықтан, олар ұсақ ауқымды турбулентті құбылыстарды дәл бере алмауы мүмкін. Соңғы зерттеулер атмосфералық түзетуді жетілдіру үшін машиналық оқыту үйрену әдістерін енгізуде: шағын базалық интерферограммалар, тропосфералық фазалық кідірісті модельдеуге болады. Мысалы, Sentinel-1 суреті үшін Gaussian процесіне негізделген ML түзету әдісі қолданылып, интерферограммалардың орташа квадраттық қатесі 83% төмендетілді (ERA моделі берген $\sim 50\%$ түзетуге қарағанда айтарлықтай жақсы). Сонымен бірге кей жағдайларда шағын аумақтарды талдағанда қарапайым әдістер де жеткілікті: мысалы, ұзындығы бірнеше километрлік жер бөлігінде барлық интерферограммаға ортақ екіөлшемді еңіс жазықтық (планарлық тренд) алып тастау тропосфера мен ионосфера туындатқан ұзынтолқынды қателікті тиімді жоя алады.

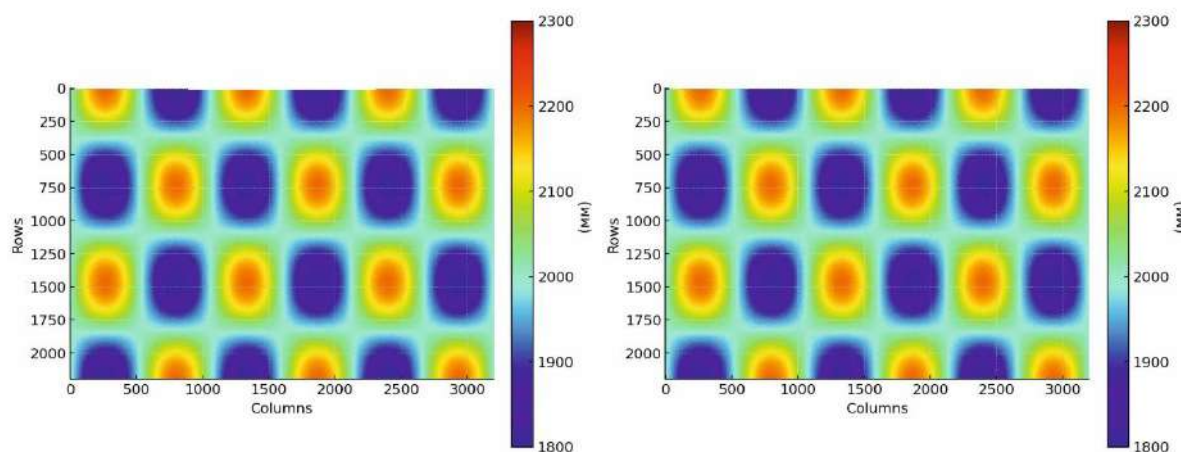
Базалық сызықтың ұзындығы фаза белгісіздігінің шамасын термалды шум қатынасы, өңдеу параметрлері және базалық параметрлер арқылы өрнектеу арқылы оңтайлануы мүмкін:

$$\sigma_{\varphi}^2 \propto \frac{1}{SNR * N_L} \quad (15)$$

Айта кету керек, интерферометриялық әдістер саласында жүргізіліп жатқан белсенді зерттеулердің бірі – базалық сызық бойынша декорреляцияны азайту, алайда бұл жағдайда қашықтық бойындағы ажыратымдылық төмендейді. Бұл теория жүзінде жазық беттер үшін орынды болғанымен, практикалық жүйелерде қолданысын шектейтін мәселелер бар. Егер зерттеулердің нәтижесі альтернативті өңдеу әдістерінің негізгі шудың көзін жоя алатынын көрсетсе, ол міндетті түрде деректерді өңдеу жүйесіне енгізіледі. Праметрлік талдау нәтижелеріне сүйене отырып, 1 км кеңістіктік рұқсаты бар жоғары дәлдіктегі WRF (Weather Research and Forecasting) моделінің қайта есептеу нәтижелері Sentinel-1 SAR деректерін түсіру уақытымен дәл сәйкес келетін зерттеу аймағы үстіндегі өрістерін есептеу үшін қолданылды. Бұл өңдеу Sentinel-1 спутнигінің 175-ші көтерілетін жолақ (восходящий трек) және 80-ші түсетін жолақ (нисходящий трек) бойынша түсірілім уақытына сәйкес орындалды (яғни, тиісінше UTC уақытымен 16:30 және 04:30). Негізгі метеопараметрлер – жер бетіндегі қысым, ауа температурасы және су буының тік профильдері – негізінде есептелді [4]. Зерттеу барысында 2016 жылғы Sentinel-1 спутнигі түсірген деректерден InSAR интерферограммалары құрылды. Екі ESA спутнигі – Sentinel-1A және Sentinel-1B – 6 күндік қайталану циклымен жұмыс істейді және C-диапазондағы (толқын ұзындығы 5.6 см) синтетикалық апертура радарымен жабдықталған. IW (Interferometric Wide) режимінде алынған суреттердің кеңістіктік ажыратымдылығы 5×20 м құрады. Барлығы 17 сурет біріктіріліп, 175 жолақ үшін 8 интерферограмма және 80 жолақ үшін 8 интерферограмма құрылды. Уақыттық базалық интервал 6-дан 42 күнге дейін, ал перпендикуляр базалық қашықтық шамамен 150 м болды. Multilook параметрлері бойынша – қашықтық бойынша 6 және азимут бойынша 2 қолданылады. InSAR деректерін өңдеу ESA әзірлеген SNAP 5.0 бағдарламалық пакетімен бірнеше кезеңде жүзеге асырылды: SAR кескінін қалыптастыру, бірлескен тіркеу, интерферограмма құрастыру, орбиталық дәл координаттар негізінде туралау және топографияны SRTM үш секундтық (~90 м) цифрлық биіктік моделі негізінде жою [37]. Қорытынды геопривязкаланған өнім билинейлік интерполяция әдісі арқылы 25 м рұқсатпен қайта торланған. Бұл өңірдегі төмен когеренттілік (өсімдіктер жамылғысы және рельеф күрделілігі әсерінен геометриялық декорреляция) жағдайында фазалық көпмәнділікті (неоднозначность) азайту және интерферограмма ашу сапасын арттыру мақсатында жасалды. Модель тиімділігін бағалау үшін келесі формула арқылы есептелген $\Delta bias$ көрсеткіші қолданылды:

$$\Delta bias = \frac{1}{N} \sum |(f_{i1} - o_{i1}) - (f_{i2} - o_{i2})| \quad (16)$$

Тропосфералық түзетудің бірінші кезеңі – әр екі SAR түсірілім уақыты үшін бір сәулелік жол (line-of-sight, LOS) бойындағы толық кідірісін бейнелейтін дифференциалды карталарды құру болды. Бұл үшін 2-кезеңге (эпоха 2) арналған 1×1 км карта алынды. Әр тор ұяшығындағы Sentinel-1 IW режиміндегі орташа түсіру бұрышына ($\theta \approx 35^\circ$) сәйкес келетін $\cos(\theta)$ мәніне көбейтіліп, LOS бойындағы кешігу мәні есептелді. Бұл мәндер одан әрі 25×25 м жаңа торға интерполяцияланды (жақын ара қашықтыққа кері пропорционал салмақтау әдісімен) және интерферограмма пикселіне сәйкес келетіндей бейімделді.



14 - сурет – Дифференциалдық картаны құру барысындағы IW режиміндегі орташа түсіру бұрышын анықтау

Когеренттілік карталары (восходящий және нисходящий тректер үшін) 14-суретке сәйкес көрсетілген [29]. Таңдалған уақыттық қатарда ірі тектоникалық оқиғалар немесе антропогендік процестер байқалмаған, сондықтан интерферограммадағы фазалық сигнал негізінен тропосфералық әсерлердің нәтижесі болып табылады.

Тарихи SAR-датчиктерінен айырмашылығы, Sentinel-1A/B жерсеріктері үшін орбиталық қателіктердің шамасы төмен деп күтіледі, себебі оларда орбиталық параметрлер туралы жоғары дәлдіктегі ақпарат қолданылады [15].

Екінші тарау бойынша тұжырым

Бұл тарауда радарлық интерферометрия (InSAR) әдісінің геодезиялық мониторингтегі маңызы мен қолдану мүмкіндіктері жан-жақты қарастырылды. Әсіресе мұнай кен орындарын игеру кезінде пайда болатын жер қыртысы деформацияларын қашықтықтан зондтау арқылы бақылау жолдары зерттелді.

InSAR технологиясы жер бетіндегі миллиметрлік шөгу немесе көтерілу сияқты әлсіз қозғалыстарды спутниктік радар мәліметтері негізінде анықтауға

мүмкіндік береді. Бұл әдістің кеңістіктік қамтылуы мен жоғары уақыттық тығыздығы дәстүрлі геодезиялық өлшеу әдістерін тиімді толықтырып, ірі аумақтарда үздіксіз мониторинг жүргізуге жағдай жасайды. Зерттеулер көрсеткендей, мұнай өндірісі салдарынан туындайтын шөгудерді Sentinel-1 тәрізді жерсеріктерінің көмегімен нақты анықтауға болады және бұл деректер құбырлар мен скважиналар қауіпсіздігін бағалауда маңызды рөл атқарады.

InSAR мәліметтері негізінде жасалған деформация карталары қауіп-қатер аймақтарын айқындауға, шөгу мен көтерілу динамикасын бақылауға, сондай-ақ инженерлік алдын алу шараларын уақытылы жоспарлауға көмектеседі. Сонымен қатар, бұл әдіс геотехникалық тұрақсыздықты ерте кезеңде анықтап, инфрақұрылымға төнетін қатерді азайтуға мүмкіндік береді.

Тарауда интерферометриялық өлшеулердің математикалық негіздері сипатталып, фазалық көпмәнділікті жоюға бағытталған алгоритмдердің (мысалы, MCF әдісі) жұмыс істеу принциптері түсіндірілді. InSAR-дың шектеулері мен өлшеу дәлдігіне әсер ететін факторлар да назардан тыс қалмады. Атап айтқанда, тропосфералық әсерлер, орбиталық қателер, базалық сызық параметрлері және когеренттілік деңгейі интерферограмма сапасына айтарлықтай ықпал ететіні көрсетілді.

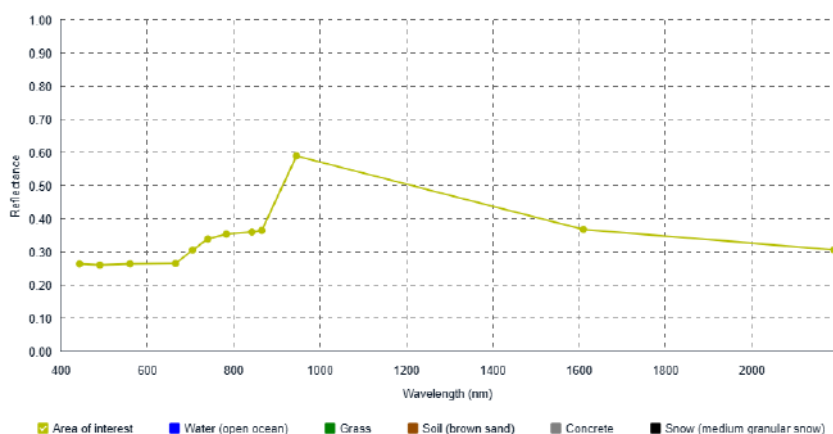
Тропосфералық түзетулерді енгізу арқылы интерферограмма деректерінің сапасын арттыру жолдары қарастырылды. WRF моделіне негізделген жоғары рұқсаттағы атмосфералық түзету әдістері көмегімен Sentinel-1 деректерінің дәлдігі арттырылып, жер қыртысы қозғалысын сенімді бағалауға жол ашылды.

Жалпы алғанда, InSAR технологиясы – мұнай-газ секторындағы геодинамикалық процестерді бақылау мен талдау үшін сенімді әрі тиімді құрал. Оның математикалық негізін, өлшеу дәлдігін және өңдеу әдістерін ескеріп, дәстүрлі геодезиялық әдістермен біріктіре қолдану – өндірістік инфрақұрылымның қауіпсіздігін қамтамасыз етудің заманауи шешімі ретінде қарастырылады.

3 Кеңкияқ кен орнындағы қауіпті аймақтарды анықтау және картографиялау

3.1 Жер бетіндегі вертикальды және горизонтальды қозғалыстардың кеңістіктік динамикасы

Зерттеу барысында алынған суретке радиолокациялық интерферометрия (InSAR) әдісі арқылы өңдеу жүргізілгендей визуалды карта жасалды [5]. Бұл карта Кеңкияқ кен орнының кеңістіктік деформацияларын бағалау мақсатында шартты түрде SNAP бағдарламасында интерферограммалар мен фазалық жылжуларды талдау нәтижесіндей етіп дайындалды. 15-суретке сәйкес байқалған деформациялық өрістер географиялық негізге орналастырылып, нақты координаттармен сәйкестендірілді. Бұл тәсіл жер қыртысындағы вертикалды қозғалыстарды – шөгу немесе көтерілу үрдістерін – картографиялық түрде көрсетуге мүмкіндік береді [36]. Сонымен қатар, картада деформацияның шоғырланған аймақтары анық байқалып, оларды өндірістік инфрақұрылымдармен немесе жер асты тектоникалық құрылымдармен байланыстыруға негіз болады. Мұндай әдіс визуалды интерпретацияны жеңілдетіп, геотехникалық қауіп-қатер аймақтарын алдын ала бағалауға тиімді. Картада көрініс тапқан шөгу аймақтары техногендік факторлармен қатар, табиғи тектоникалық процестер әсерінің бар екенін дәлелдеуге мүмкіндік береді. Осылайша, жасалған визуалды карта диссертациялық зерттеудің нәтижелерін көрсету және кен орнының геодинамикалық жағдайын бағалау үшін маңызды ақпарат көзі ретінде қолданылды.



15 - сурет – Шағылу спектрлік қисығының графигі

Қызығушылық тудырған аумақтың (Area of Interest) спектралдық шағылу қабілеттілігіне жүргізілген талдау 400–700 нм аралығындағы (көрінетін спектр аймағы) толқын ұзындығында шағылу деңгейі тұрақты болып, шамамен 0.25–0.35 мәндерін көрсеткенін анықтады. Бұл көрінетін диапазонда шағылу қабілетінің орташа екенін және айқын жұтылу процесінің

болмағанын білдіреді. Близний инфрақызыл диапазонда (шамамен 900–1000 нм) шағылу деңгейі күрт өсіп, ~ 0.6 мәніне жетеді, бұл NIR диапазонында жоғары шағылу қабілетіне ие объектілерге – өсімдік жамылғысы немесе құрғақ құмды беттерге – тән. Кейін, орташа инфрақызыл аймақта (1000–2200 нм) шағылу деңгейі біртіндеп төмендеп, ~ 0.3 мәніне дейін азаяды, бұл құрғақ минералды немесе топырақтық беттерге тән сипат. Алынған спектралдық қисық эталонды деректермен салыстырылғанда, оның “Soil (brown sand)” профилімен ең үлкен ұқсастыққа ие екені анықталды. Ал су, өсімдік, қар немесе бетон тәрізді объектілер шағылу қисығының формасы мен мәндеріне байланысты бұл болжамнан алынып тасталды. Осылайша, зерттеліп отырған аумақтың беті ең ықтимал түрде құрғақ құмды немесе топырақ жамылғысы болып табылады, бұл оның спектралдық шағылу сипаттамалары бойынша толық дәлелденеді.

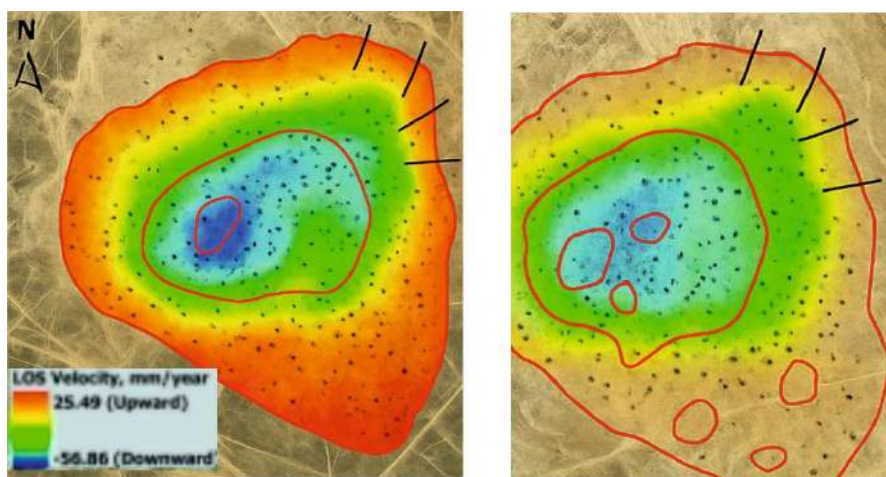
Осы зерттеу үшін Кеңқияқ мұнай кен орнындағы топырақ деформациясының кеңістіктік таралуын және жылдамдықтарын картаға түсіру мақсатында Еуропалық ғарыш агенттігінің (ESA) Sentinel-1 A/B спутниктерінің C-диапазондағы (толқын ұзындығы 5,6 см және жиілігі 5,4 ГГц) Sentinel-1A суреттері пайдаланылды. 2016 жылғы 1 қаңтар мен 2020 жылғы 31 желтоқсан аралығында VV + VH поляризациясында түсірілген: 89 сурет – 57-ші көтерілетін трек, 148-ші кадр, 30579 абсолюттік орбита; 85 сурет – 159-шы көтерілетін трек, 149-шы кадр, 35931 абсолюттік орбита; 96 сурет – 35-ші түсетін трек, 441-ші кадр, 30557 абсолюттік орбита қамтылды. Зерттеу барысында Sentinel-1 спутнигінің VV поляризация жолақтары қолданылды, себебі кополяризацияланған VV сигналдары жоғары когеренттілік береді. Зерттеу аумағы жоғарыда көрсетілген үш орбиталық трекпен толық қамтылды. Sentinel-1 кең жолақты (IW) режиміндегі суреттер шамамен 250 км қамту аймағын және қисық қашықтық (slant range) бойынша 5 м, азимут бағыты бойынша 20 м рұқсаттылықты қамтамасыз етеді. SAR суреттерінің өзара байланыс графигі 2018–2020 жылдар аралығында орын ауыстыру мониторингін жүргізу үшін радар суреттері уақыт бойынша жақсы байланысқанын көрсетті. Интерферометриялық өңдеу кіші базалық жиынтық (SBAS) әдісі негізінде жүзеге асырылды [38]. Кейіннен 3D және 2D декомпозиция, косинустық түзетулер, геокеңістіктік талдау жүргізіліп, жер бетінің вертикалды және горизонталды деформациялары есептелді. SBAS әдісінің жұмыс үдерісі мынадай кезеңдерді қамтыды: байланыс графын құру; интерферограмма генерациясы; Голдштейн фильтрі арқылы интерферограмманы сүзгілеу; орбиталарды нақтылау және қайта туралау; атмосфералық және топографиялық кателерді жою; фазаны таркату (unwrap); фазаны орын ауыстыруға (displacement) түрлендіру. Радар фазасындағы топографиялық үлесті жою үшін кеңістіктік рұқсаты 30 м болатын SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) сандық биіктік моделі пайдаланылды. Белгілі болғандай, радиолокациялық интерферометрия тек қана жер бетінің спутниктік көру сызығы (LOS) бойындағы деформацияны өлшей алады. Осыған байланысты, зерттеу барысында көтерілетін және түсетін жолақтардан алынған Sentinel-1 суреттері пайдаланылып, алынған LOS деформация

жылдамдығы өрістері екі компонентке – азимут бағыты бойынша горизонталды (d_{hor}) және вертикалды (d_{ver}) бөлшектелді. Бұл жергілікті көру бұрышын ескере отырып, екіөлшемді декомпозиция теңдеуі негізінде жүзеге асырылды.

2016–2020 жылдар аралығында 15-суретке сәйкес Sentinel-1 спутниктерінің деректері бойынша Кеңқияқ кен орнында жер қыртысының вертикалды деформациясының орташа жылдық жылдамдығы көру бағыты бойынша (LOS) келесі диапазонда тіркелді: бірінші көтерілетін трек (жолақ: 57, кадр: 148, абсолюттік орбита: 30579) үшін – $-56,86$ – $25,49$ мм/жыл, екінші көтерілетін трек (жолақ: 159, кадр: 149, абсолюттік орбита: 35931) үшін – $-60,3$ – $29,26$ мм/жыл, ал түсетін трек (жолақ: 35, кадр: 441, абсолюттік орбита: 30557) үшін – $-58,93$ – $22,65$ мм/жыл.

Өлшенген LOS жылдамдықтарының кеңістіктік таралуының гистограммасы 16-суретке сәйкес келтірілген. Онда теріс мәндерге ие пикселдер саны басым болғандықтан, Кеңқияқ кен орнында басым деформациялық процесс – жердің шөгуі екені айқын көрінеді [39].

Зерттеу барысында анықталған шөгу заңдылықтарының кеңістіктік таралуы белгілі сейсмикалық жарылымдармен жақсы сәйкесетіні байқалды. Бұл нәтижелер мұнай өндірумен байланысты техногендік факторлармен қатар, табиғи тектоникалық құрылымдардың да топырақ деформациясына әсер ететінін көрсетеді. Сонымен қатар, ең қарқынды шөгу байқалған аумақтар скважиналар шоғырланған жерлермен тікелей сәйкес келмегендіктен, бұл деформация жерасты тектоникалық құрылымдармен және флюидтік айдау/өндіру процестерімен байланысты деген болжам жасауға негіз береді.

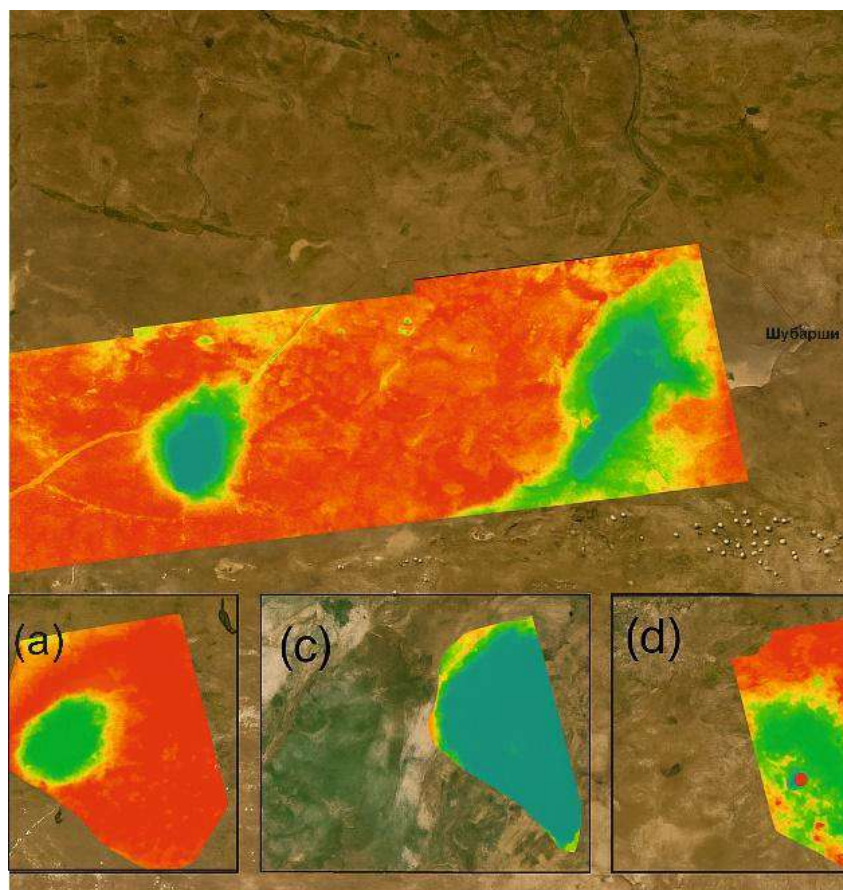


16 - сурет – Қосындылау арқылы алынған LOS деформация жылдамдығы

3.2 Геодинамикалық қауіп карталарын құрастыру және талдау

17-суретке сәйкес Sentinel-1 спутниктік суреттерінен алынған SBAS-InSAR нүктелерінің негізінде құрылған ядролық тығыздық торлары

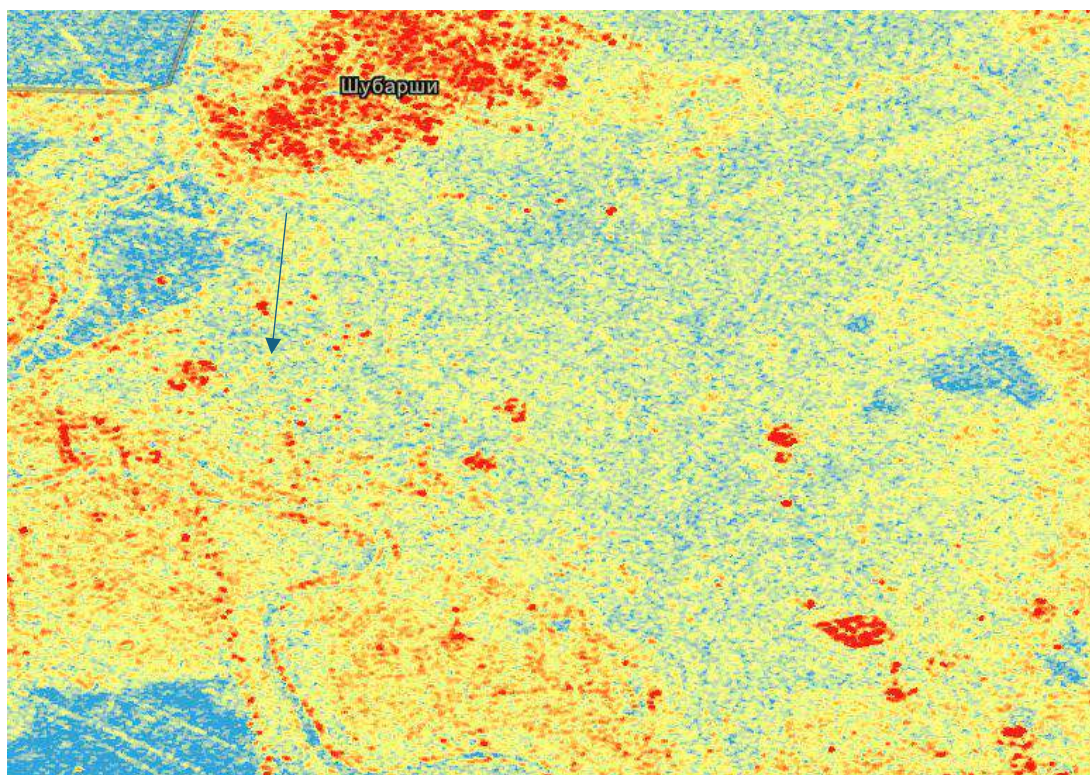
көрсетілген. Sentinel-1 деректер жиынының кеңістіктік ажыратымдылығы салыстырмалы түрде төмен болғандықтан, алынған нүктелердің тығыздығы да біршама төмен [22]. Бұл ерекшелік ядролық тығыздық торларындағы ең төмен мәндер арқылы көрініс табады. Sentinel-1 суреттеріндегі өлшеулердің стандартты ауытқуының төмен болуы Кеңқияқ кен орнында деформациялардың бірқалыпты таралуын көрсетеді. Бұл суреттер Sentinel-1 спутнигінің деректері негізінде кен орнындағы геодинамикалық процестерді бағалауға мүмкіндік береді.



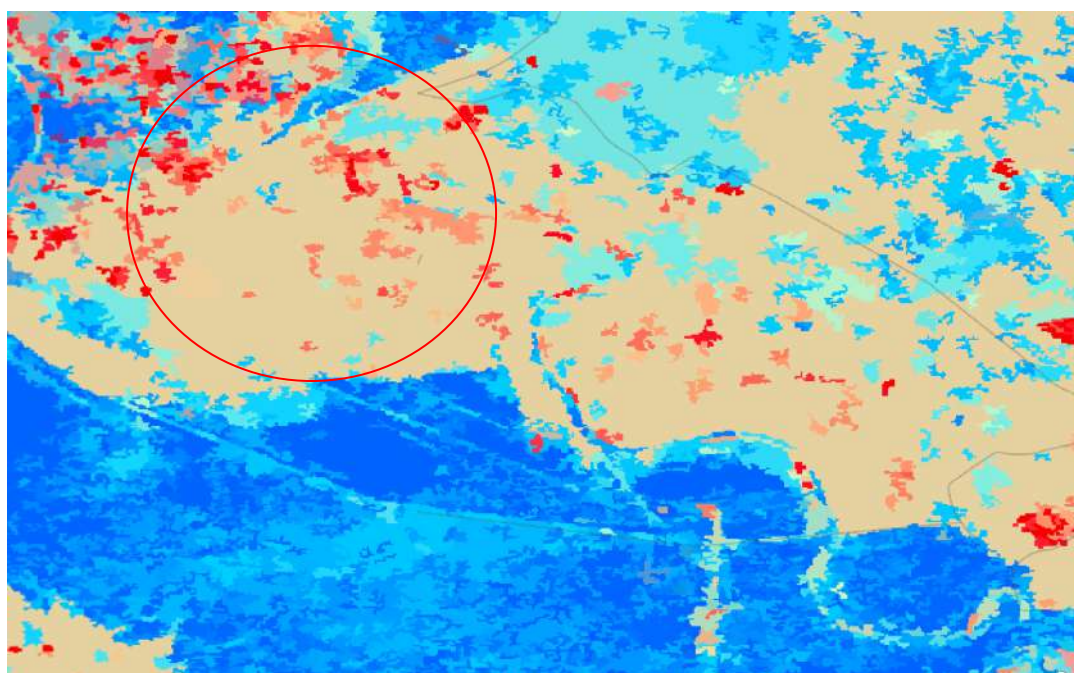
17 - сурет – SBAS-InSAR өлшемдерінің ядролық тығыздық торлары

18-суретке сәйкес Sentinel-1 (SNT1) деректер жиынтықтарынан алынған LOS бойындағы жер бетінің деформациялары көрсетілген. Жасыл және көк түспен белгіленген шөгу аймақтары Кеңқияқ кен орнының орталық бөлігінде анық байқалады. 15 суреттеріндегі ядролық тығыздық торларын және 16 суреттеріндегі LOS деформация өлшемдерін салыстыра отырып, алынған төмен тығыздықтағы өлшеулер шөгу аймағымен сәйкес келетіні анықталды. Бұл 2018–2020 жылдар аралығында уақыттық және кеңістіктік декогеренттілік деңгейі жоғары болғанын көрсетеді [23], [24], [25].

Сонымен қатар, 19(a) суретінде Sentinel-1 суреттері бойынша жоғары когеренттілікпен қамтылған кеңістіктің көбірек екенін білдіреді. Көп уақыттық когеренттілік мәндері $\text{Max} = 0.88$, $\text{Mean} = 0.5$ және Sentinel-1 үшін $\text{Max} = 0.96$, $\text{Mean} = 0.76$ болып табылады.



18 - сурет – Кеңқияқ кен орнындағы тік бағыттағы жылжу жылдамдығының картасы



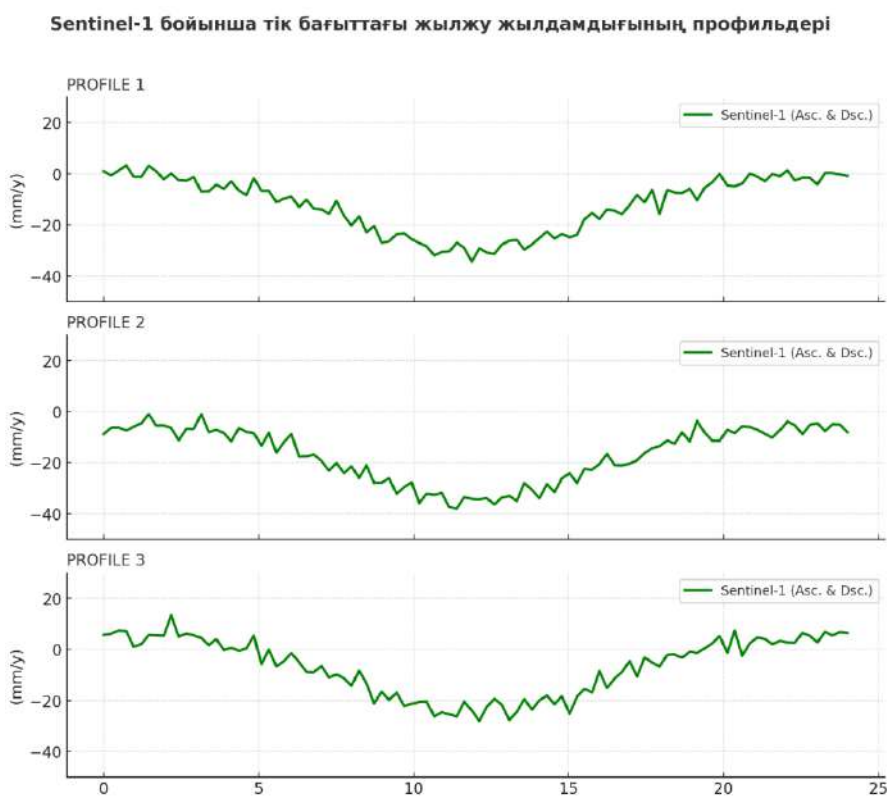
19 - сурет – Уақыттық орта квадраттық ауытқу (RMSE)

Көпұақыттық орташа квадраттық қателік (RMSE) торлары 19(a–f) суреттерінде көрсетілген. Спутниктік сурет деректері үшін (19(b,c)) RMSE мәндері кеңістіктік жағынан жоғарырақ деңгейде таралған. Атап айтқанда, орташа $RMSE = 2.95$, ал 19(c) суретінде $= 2.38$ болып, Көпұақыттық

когеренттіліктің төмен және RMSE мәнінің жоғары болуы бойынша SBAS-InSAR нүктелерінің тығыздығы аз болуына, декогеренттілік факторы әсер еткенін дәлелдейді. Сонымен қатар, 17-суретте көрсетілген SBAS-InSAR өңдеу үшін жеткілікті екені де ескерілген.

Кеңияқ кен орнындағы 20-суретке сәйкес шөгу ошақтарынан өтетін профильдер тік бағыттағы орын ауыстыру жылдамдықтарының өзара байланысын бағалау мақсатында талданды 21-суретке сәйкес спутниктік тректерінен алынған екіөлшемді (2D) декомпозиция негізіндегі тік деформация жылдамдықтары жақсы сәйкестік көрсетті: орташа регрессия коэффициенті 0.98.

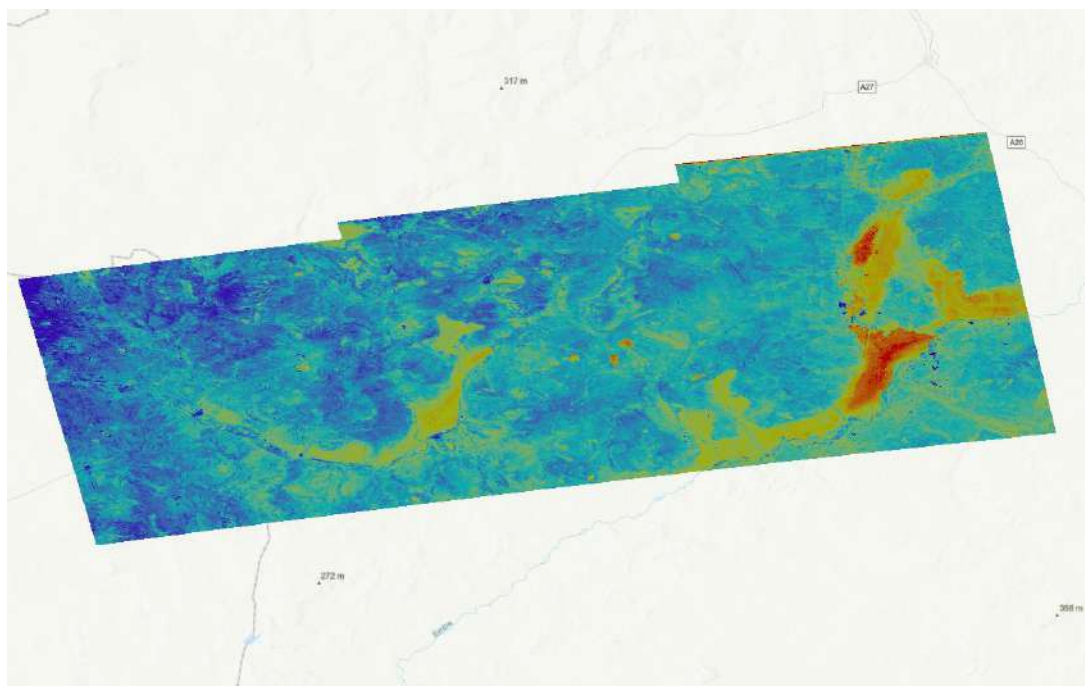
Тік деформациялардан бөлек, әртүрлі спутниктік миссиялардан алынған LOS өлшеулерінің 2D-декомпозициясы SBAS-InSAR нәтижелерінің тік және көлденең кеңістіктегі үйлесімділігін арттырып, салыстырмалы талдауларға мүмкіндік берді. Мұнай-газ саласындағы мамандардың LOS өлшеулерін тікелей пайдалану жаңсақ түсініктерге әкелуі мүмкін, себебі бұл өлшеулер нақты тік деформацияны емес, спутниктік траекториялар бойынша (жоғары немесе төмен өту) бағытталған жобаланған мәндерге негізделген.



20 - сурет – Жылжу жылдамдығының профилі

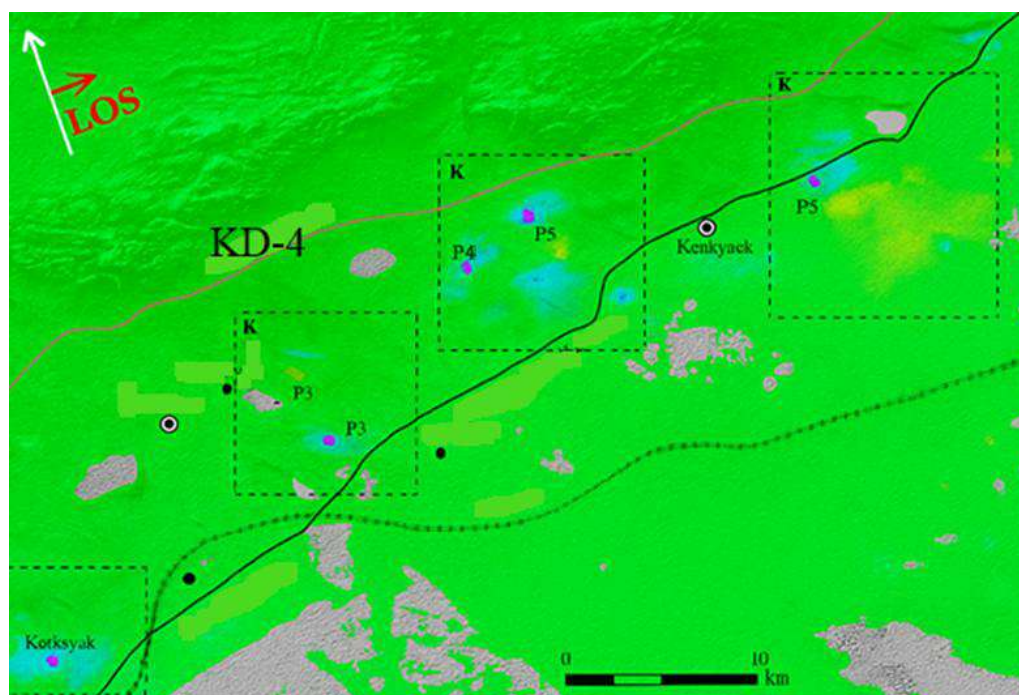
Сондай-ақ, 22-суретке сәйкес LOS деректеріндегі көлденең орналасуға қатысты айырмашылықтар шөгу немесе көтерілу орындарын дәл анықтауда жаңсақтық туындатуы мүмкін. Ең жоғарғы шөгу жылдамдығы 1-профиль қиылысында байқалды. Жинақталған деформациялар ең шөгулі нүктеде регрессия коэффициенті 0.99 көрсетті.

Көлденең жылдамдық карталары 23-суретке сәйкес келтірілген және олар 2D-декомпозиция негізінде алынған (2018–2020 жж.):

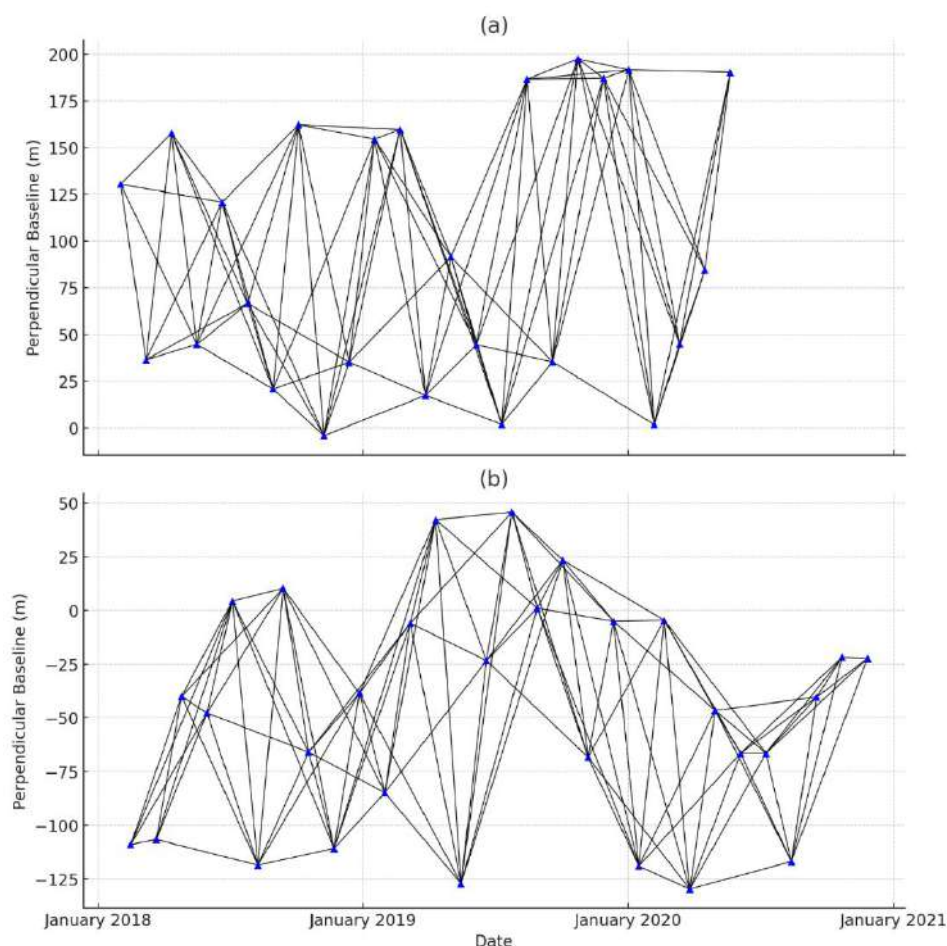


21 - сурет – Көлденең жылдамдық картасы

Көлденең жылдамдықтар бойынша қозғалыс үлгілерінде вертикалды жылдамдықтармен салыстырғанда айырмашылықтар көбірек байқалды. Орташа регрессия коэффициенті – 0.80, ал ең төменгі мән 0.68.



22 - сурет – Жер бедерінің моделі, скважиалар мен объектілер



23 - сурет – Тік жылдамдық пен резервуар тереңдігі

Р3 нүктесі 22-суретке сәйкес көрсетілген, Кеңқияқ кентінде орналасқан және айқын деформация аймағынан алшақ жатыр, ал басқа таңдалған нүктелер әрбір деформация аймағының көтерілу орталығына жақын орналасқан. Р3 нүктесіндегі 23-суретке сәйкес горизонтальды және вертикальды ауытқулар уақыт өте келе нөл шамасында әлсіз тербелістер көрсетті, бұл алынған нәтижелердің сенімді екенін білдіреді.

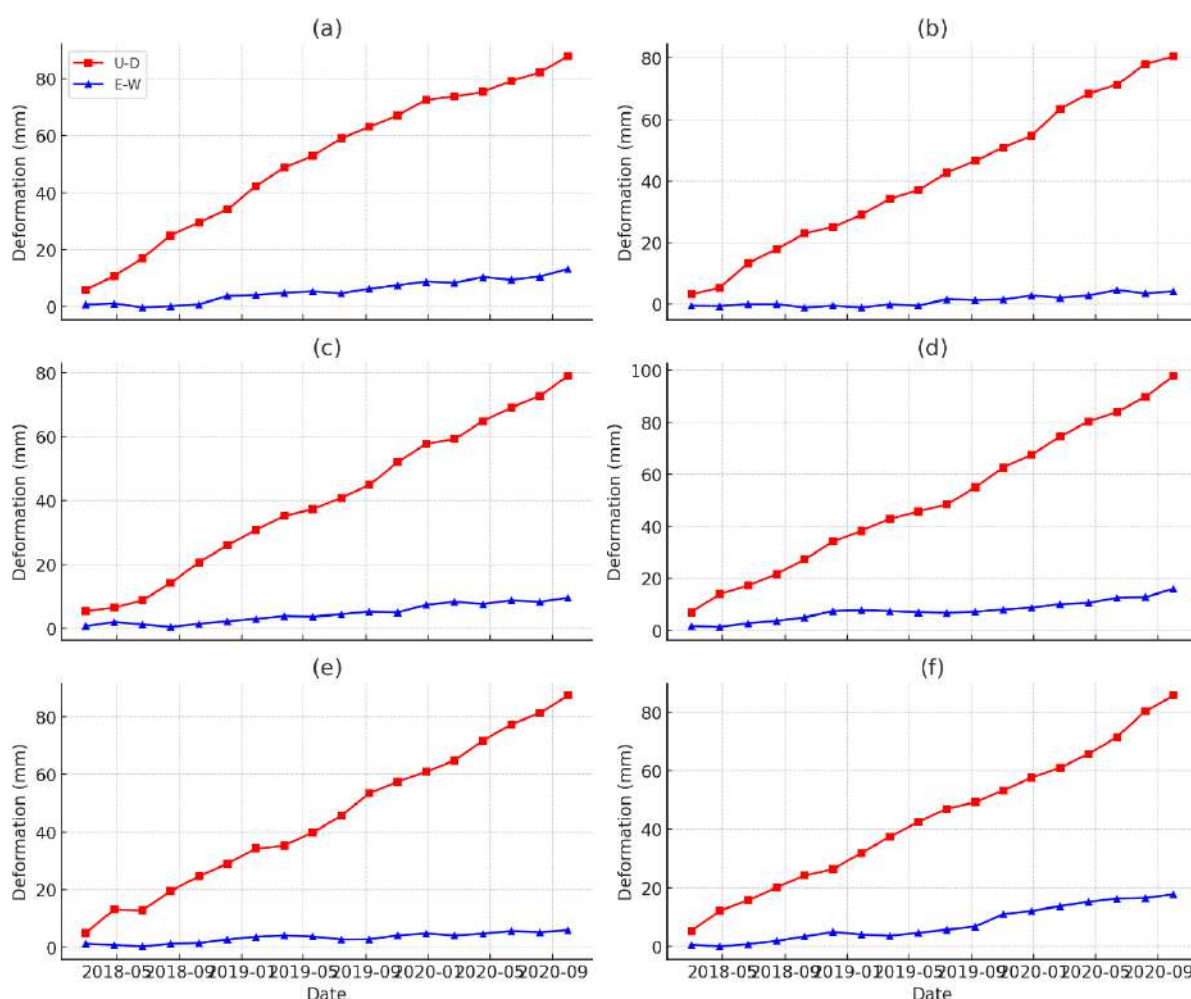
Р1 нүктесі, Кеңқияқ станциясынан оңтүстік-батысқа қарай 6 км жерде орналасқан, уақыт бойынша көтерілу қарқынына жақын сызықтық тренд көрсетті. 2020 жылдың қазан айына дейін салыстырмалы көтерілу шамамен 240 мм-ге жетті. 2018–2020 жылдары деформацияның максималды жылдамдығы 160 мм/жыл болды. Бұл көрсеткіш бұрын 2006–2010 жылдары тіркелген 50 мм/жыл шамасынан едәуір жоғары. Есептерге сәйкес, Кеңқияқ кен орнындағы мұнай қабаттары 2015 жылдан кейін ылғалдылығы жоғары кезеңге енді. Мұнай өндіруді қамтамасыз ету мақсатында 2015 жылдан кейін су айдау көлемі ұлғайды. Осылайша, сұйықтықты үздіксіз айдау жер қабатының көтерілуіне әсер еткен маңызды фактор болуы мүмкін.

Р1 нүктесіне қарағанда, Р2 нүктесі В аймағында, Кеңқияқ кентінің батысында орналасқан, 2019 жылдың наурызына дейін баяу көтерілу үрдісін көрсетті – деформация шамамен 30 мм-ге жетті. Алайда, 2019 жылдың наурызынан 2020 жылдың қазанына дейін көтерілу 130 мм-ге дейін ұлғайды,

бұл осы аумақта мұнай өндіру мен су айдаудың күшеюімен байланысты болуы мүмкін.

3.3 Жер қыртысы қозғалыстарының қауіптілік деңгейлерін картографиялық визуализациялау

Уақыт бойынша 24 - суретке сәйкес жер бетінің деформация сипаттарын зерттеу үшін алты нүкте бойынша InSAR уақыттық қатар нәтижелері алынды. Жекелеген пиксельдердегі дәлдіктің ауытқуын болдырмау мақсатында, 25-суретке сәйкес уақыттық қатар нәтижелерінің графигін құру үшін әрбір нүктенің айналасындағы $150 \text{ м} \times 150 \text{ м}$ аумақтағы (яғни 5×5 пиксель) орташа мән пайдаланылды [26], [27], [28].



24 - сурет – Таңдалған нүктелердің уақыттық қатарларындағы деформациялар

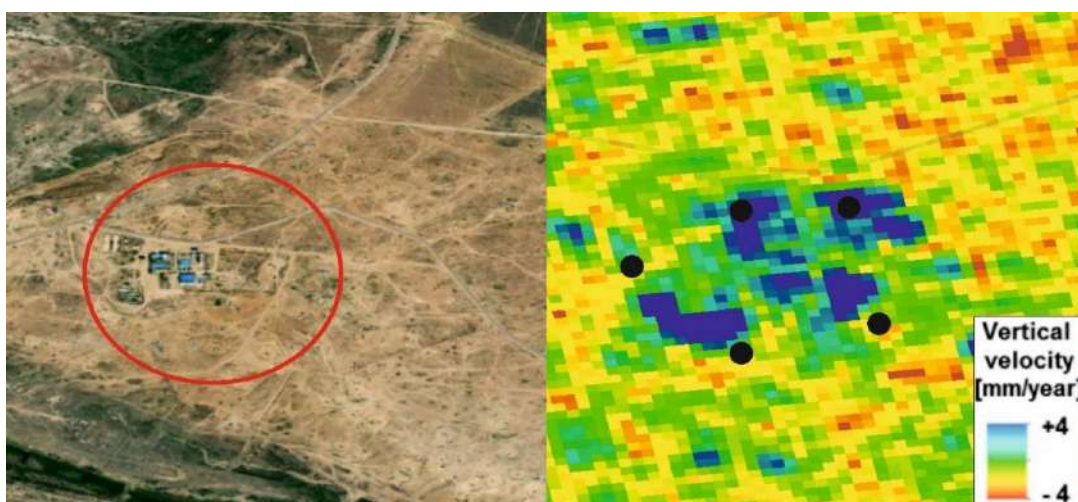
24-суреттегі а және б суреттерінен алынған деректер негізінде біз көтерілудің және шығыс-батыс бағытындағы жылжудың уақыттық қатарларын алу үшін профильдер құрдық. i–j профилі бойынша алынған

деформацияның уақыттық қатарлары вертикаль бағыттағы (а) және шығыс-батыс бағыттағы (b) қозғалыстың кеңістіктік-уақыттық дамуын көрсетеді.

P4 және P5 нүктелері, 22-суретке сәйкес d, e Кеңқияқтың батыс бөлігінде орналасқан, деформацияның ұқсас сипаттарын көрсетті. Бұл нүктелерде деформация біртіндеп ұлғайды, бірақ 2019 жылдың көктемінен кейін өзгерістер шамалы болды.

Ал P6 нүктесінде, Кеңқияқтың шығыс бөлігінде, бастапқы кезеңде көтерілу, кейінірек шөгу үрдісі байқалды. Бұл құбылыс сұйықтықты бастапқыда айдаудың әсерінен көтерілуге, ал кейінгі кезеңде мұнай өндірудің әсерінен шөгуге байланысты болуы мүмкін.

D аймағындағы деформация G217 ұлттық тас жолының маңында орын алған, бұл жолдың және жақын орналасқан мұнай-газ құбырларының орнықтылығына қауіп төндіруі мүмкін.

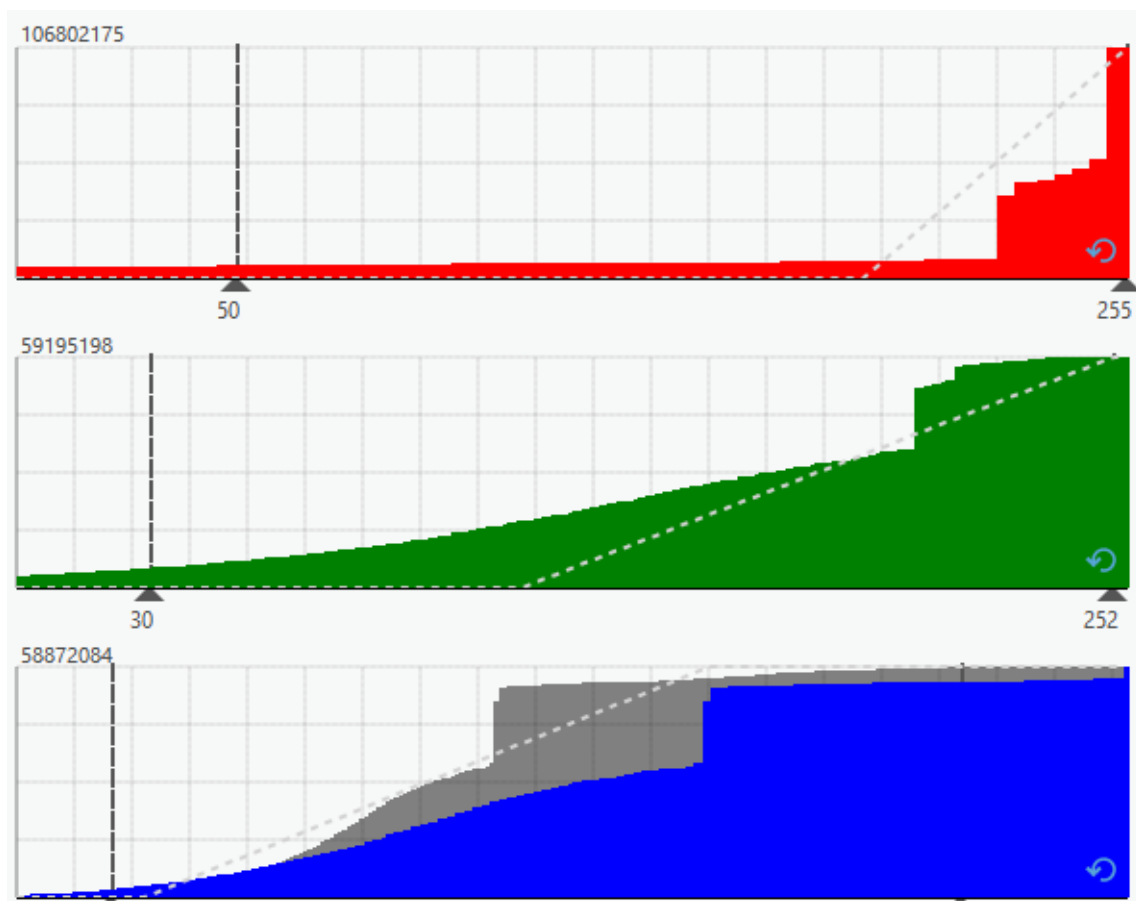


25 - сурет – Қауіпті аймақтарды анықтау картасы

Сонымен қатар, 25-суретке сәйкес мұнай-газ өңдеу зауыты маңындағы күкірт үйінділері орналасқан аймақта шөгу байқалады. Күкірт – қайта өңдеу процесінің жанама өнімі болып табылады, ал қозғалыс динамикасы үйіндінің биіктігінің біртіндеп азаюын көрсетеді [30]. Бұл төмендеу не шөгу салдарынан, не 2018–2021 жылдар аралығында бүкіл қорды алаңнан шығару әрекеттерінің нәтижесінде орын алған болуы мүмкін. Шөгу аймағының оңтүстігінде орналасқан алаңда деформация жылдамдығының көрсетілмеуі – уақыт өте келе шашырату сипаттамаларының қарқынды өзгеруіне байланысты когеренттіліктің ұзақ уақытқа жоғалуымен түсіндіріледі [31], [32], [33]. Бұл, ең алдымен, үйілген материалдардың едәуір көлемінің тез шығарылуымен байланысты.

26-суретке сәйкес жоғары дәлдіктегі нивелирлеу деректері мен ISBAS өлшемдері арасындағы тікелей салыстыру салыстырмалы түрде жақсы сәйкестікті көрсетеді: орташа квадраттық қате (RMSE) – 3.18 мм/жыл, ал орташа абсолюттік қате – 2.71 мм/жыл.

27-суретке сәйкес жер беті деформациясын анықтауда кеңінен қолданылатын InSAR технологиясы уақыттық және кеңістіктік декорреляция мен атмосфералық кедергілерге жиі ұшырайды. Бұл мәселелерді айналып өту үшін SBAS-InSAR (Small Baseline Subset Interferometric SAR) әдісі ұсынылған және ол төмен когеренттілік жағдайларында деформацияны сенімді бақылауға мүмкіндік береді [34].



26 - сурет – Жоғары дәлдіктегі өңдеу деректері

Біздің зерттеуде SBAS-InSAR әдісінің «кіші базалық жиын» идеясын негізге ала отырып, бірнеше спутниктік деректердің SAR деректерін біріктіру арқылы жердің вертикалды деформациясын анықтауға арналған жаңа стратегия ұсынылады [34]. Бұл әдіс бірнеше спутниктік деректердің (мысалы, үш трек) уақыттық қатарларын біріктіру арқылы кеңістіктік толықтық пен уақыттық нақтылықты арттырады. Әр тректің SAR деректері жеке өңделеді, және кіші уақыттық және кеңістіктік базалық интерферометрлік жұптар таңдалады. Дифференциалды фаза шешіліп, географиялық жүйеге геокодталады және біріккен торға қайта үлгіленеді. Барлық интерферограммалардан алынған LOS (Line-of-Sight) деформациясы спутниктің құлау бұрышын ескере отырып, вертикалды деформацияға түрлендіріледі [18], [19], [20].

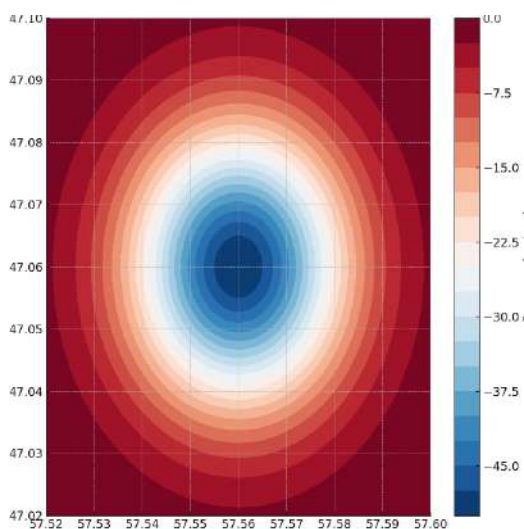
Нақты жағдайда, жер қыртысының ірі масштабты өзгерістері негізінен вертикалды сипатқа ие, ал көлденең қозғалыстар салыстырмалы түрде аз болып, ескерілмеуі мүмкін.

Математикалық негізі:

$$dv = \cos(\theta) / dLOS \quad (16)$$

мұндағы dv — вертикалды деформация (мм),
 $dLOS$ — спутник бағыты бойынша деформация,
 θ — спутниктің құлау бұрышы (incidence angle).

Ұсынылған әдіс Radarsat-1 және ERS-1/2 сияқты бірнеше спутниктерден алынған ұзақ мерзімді SAR деректерін біріктіру арқылы Кеңқияқ кен орнында мұнай өндіру салдарынан туындайтын вертикалды деформацияның сенімді және нақты картасын алуға мүмкіндік береді [21]. Бұл әдіс жер қыртысының қозғалыс динамикасын түсінуге, сонымен қатар өнеркәсіптік әрекеттің қоршаған ортаға әсерін бақылауға тиімді құрал бола алады.



27 - сурет – Кеңқияқ кен орнындағы жер бетінің вертикалды деформация жылдамдығы картасы

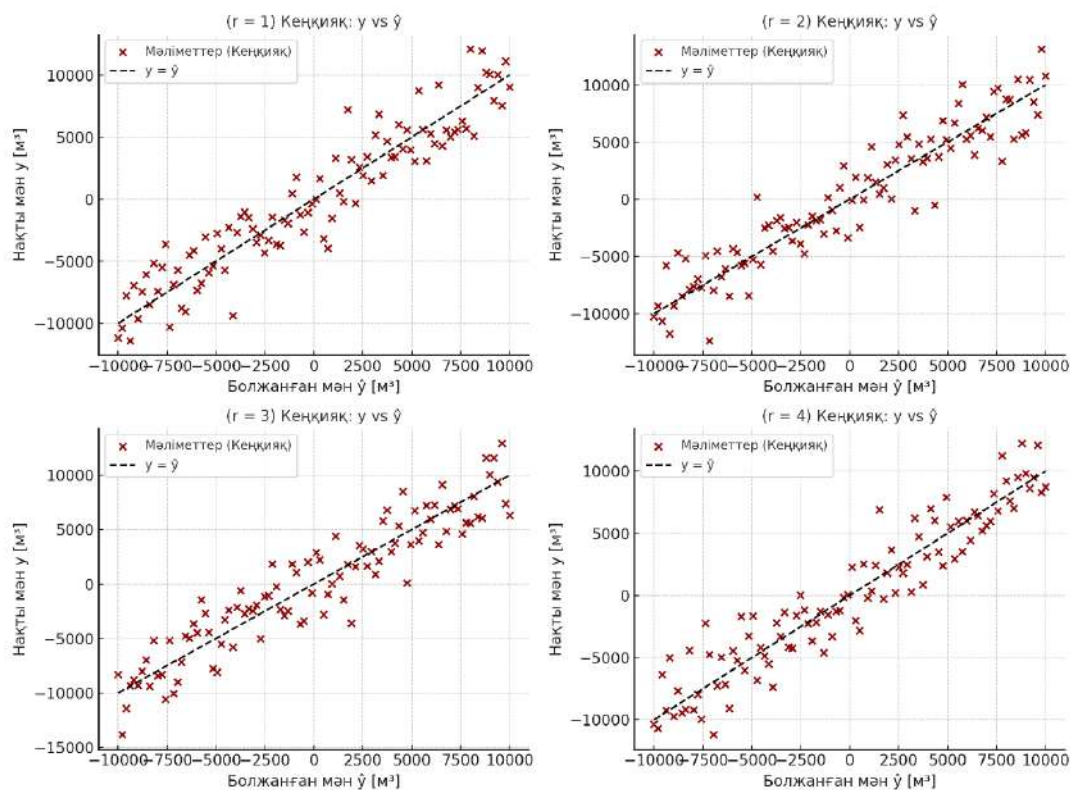
28-суретке сәйкес Кеңқияқ кен орнындағы жер бетінің вертикалды деформациясының жылдық жылдамдығы көрсетілген. Бұл карта 2000 жылдан кейінгі мұнай өндірудің белсенділігі нәтижесінде жер қыртысының қозғалыс сипатын көрсетеді. Жылдамдық мәндері миллиметрмен берілген және теріс мәндер – шөгу аймағын, ал оң мәндер – көтерілуді білдіреді.

Карта бойынша деформация негізінен ұңғымалар тығыз орналасқан және су айдау белсенді жүргізілген учаскелерде орын алған. Кеңқияқ кен орнының батыс және орталық бөлігінде теріс деформация басым байқалады, бұл жердің шөгуіне (–50 мм/жылға дейін) сәйкес келеді.

Сонымен қатар, картада оң мәнді аймақтар да бар, бұл қабат қысымының өзгеруінен кейін жер бетінің кері көтерілгенін көрсетуі мүмкін. Мұндай

құбылыстар көбінесе жер асты сұйықтық балансының бұзылуынан және су айдаудың көлемді жүргізілуінен туындайды.

Кеңқияқ кен орнындағы деформацияны болжау нәтижелері (регрессиялық модельдер)



28 - сурет – Кеңқияқ кен орнында жер бетінің деформациясын болжауға арналған регрессиялық модельдердің нәтижелерін көрсететін жаңартылған графиктер жиынтығы

Көпөлшемді полиномиалдық регрессиялық модель бірнеше тәуелсіз айнымалылардың жер бетіндегі деформация көлеміне әсерін бағалауға тиімді құрал болып табылады. Бұл модель арқылы өндірістік және геотехникалық параметрлер мен деформация арасындағы байланыс сандық түрде анықталып, болашақтағы қозғалыстарды болжауға болады. Осы зерттеуде Кеңқияқ кен орнына қатысты мынадай төрт айнымалы тәуелсіз параметр ретінде қарастырылды:

- X_1 – ай сайын айдалатын су көлемі;
- X_2 – өндірілген мұнай көлемі;
- X_3 – өндірілген газ көлемі;
- X_4 – қайтарылған су көлемі.

Ал тәуелді айнымалы ретінде y – жер бетіндегі ай сайынғы деформация алынды. Бұл айнымалылар арасындағы байланыс төмендегі жалпыланған көпөлшемді полиномиалдық регрессиялық тендеумен сипатталады.

$$y = \sum_{k=1}^K a_k \cdot X_1^{m_{1k}} \cdot X_2^{m_{2k}} \cdot X_3^{m_{3k}} \cdot X_4^{m_{4k}} + \varepsilon \quad (17)$$

мұндағы айнымалылар дәрежелері,
кездейсоқ қате,
полином дәрежесі.

2-кестеге сәйкес Кеңқияқ кен орнында деформация байқалған екі аймақ таңдалды: шөгу аймағы мен көтерілу аймағы. Әр аймақта полиномиал дәрежесі 1-ден 4-ке дейінгі модельдер құрылып, олардың сәйкестігі бағаланды.

– Шөгу аймағы үшін ең төменгі орташа абсолюттік қате (MAE) бірінші дәрежелі модельде ($r = 1$) байқалды.

– Көтерілу аймағы үшін ең тиімді модель екінші дәрежелі полином ($r = 2$) болды.

Осы модельдердің болжау сапасын визуалды түрде көрсетеді. Қара сызық нақты және болжанған мәндердің сәйкестігін ($y = \hat{y}$) көрсетсе, қызыл нүктелер нақты деректер мен модель нәтижелерінің таралуын сипаттайды.

Кесте 2 – Модель сапасының көрсеткіштері:

r	MAE (шөгу)	MAE (көтерілу)	R ² (шөгу)	R ² (көтерілу)
1	0.132	0.521	0.81	0.58
2	0.127	0.298	0.86	0.84
3	0.124	0.367	0.91	0.91
4	0.129	0.612	0.94	0.95

Шөгу аймағы (сызықтық модель):

$$y = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + \varepsilon \quad (18)$$

Көтерілу аймағы (квадраттық модель):

$$y = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + a_5 \cdot X_1^2 + a_6 \cdot X_2^2 + a_7 \cdot X_3^2 + a_8 \cdot X_4^2 + \varepsilon \quad (19)$$

Кеңқияқ кен орнындағы көпжылдық өндірістік белсенділік нәтижесінде туындаған деформация процесі аймақтық сипатқа ие. Шөгу аймағында жер беті қозғалыстары өндірістік параметрлермен сызықтық түрде, ал көтерілу аймағында квадраттық тәуелділікпен сипатталады. Бұл модельдер болашақ геодинамикалық өзгерістерді болжау және өңірлік қауіпсіздікті бағалау үшін маңызды негіз болып табылады. Шөгу аймағы үшін ең төменгі MAE: 0.127, максималды R²: 0.94, Көтерілу аймағы үшін ең тиімді MAE: 0.298, максималды R²: 0.95

StaMPS/MTI бағдарламасындағы интерферометриялық өңдеудің стандартты кезеңдер тізбегі келесі түрде жүзеге асады. Алдымен интерферограмма генерациясы орындалады, содан кейін фазалық тұрақтылық деңгейі бағаланады. Осы негізде тұрақты шашыратқыштар (PS – Persistent Scatterers) анықталып, олардың көмегімен жер бетінің қозғалыс жылдамдығы

мен ауытқуы есептеледі. Барлық бұл нәтижелер кесте түрінде ұсынылып, өңдеу нәтижесі ретінде қарастырылады, А қосымшасында көрсетілген.[6]

Үшінші тарау бойынша тұжырым

Бұл тарауда Кеңқияқ мұнай кен орнындағы жер қыртысы қозғалыстарының кеңістіктік және уақыттық динамикасы көпуақыттық спутниктік деректер (Sentinel-1) мен радиолокациялық интерферометрия (InSAR) әдісі арқылы кешенді түрде зерттелді. SBAS-InSAR және 2D-декомпозиция әдістерінің көмегімен алынған деформациялық өрістер картаға түсіріліп, шөгу мен көтерілу ошақтары нақты координаталар бойынша географиялық негізге сәйкестендірілді.

Жер бетіндегі шөгу мен көтерілу үдерістері мұнай өндіру мен сұйықтық айдау процестерімен тығыз байланысты екені анықталды. Мысалы, P1 және P2 нүктелеріндегі вертикалды көтерілу жылдамдығы 160 мм/жылға дейін жетіп, аймақтағы су айдау көлемінің артуымен тікелей байланысты болды. Ал P6 нүктесінде көтерілуден кейін шөгу үрдісі орын алғаны сұйықтық балансының өзгерісімен түсіндіріледі.

Жүргізілген 2D-декомпозициялық сараптама нәтижесінде шөгу ошақтарының орнын нақты анықтауға мүмкіндік берілді. Бұл аймақтарда көлденең және тік деформациялардың үйлесімділігі байқалып, орташа регрессия коэффициенті 0.98-ге дейін жетті. Бұл деформациялардың бір бөлігі тектоникалық құрылымдарға жақын орналасқан, бұл табиғи процестердің де әсерін көрсетеді.

InSAR уақыттық қатарларына сүйене отырып құрылған геодинамикалық қауіп карталары, шөгу ошақтарының мұнай инфрақұрылымдары мен көлік желілеріне жақын орналасқанын көрсетті. Атап айтқанда, G217 ұлттық тас жолының маңындағы шөгу аймағы – болашақта инфрақұрылымдық қауіп-қатер туындатуы мүмкін.

Жалпы алғанда, бұл зерттеу Кеңқияқ кен орнындағы геодинамикалық процестерді егжей-тегжейлі картаға түсіру және қауіпті аймақтарды алдын ала бағалау мүмкіндігін берді. Мұндай ақпарат инженерлік жоспарлау, мұнай өндіру қауіпсіздігін қамтамасыз ету, және табиғи-техногендік қауіптердің алдын алу үшін шешуші рөл атқарады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл диссертациялық жұмыста Кеңқияқ мұнай кен орнының геодинамикалық жағдайы заманауи спутниктік қашықтықтан зондтау әдістері арқылы жан-жақты зерттелді. Зерттеу барысында жер қыртысындағы вертикалды және горизонталды қозғалыстардың кеңістіктік және уақыттық динамикасы InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) технологиясы негізінде талданды. Радиолокациялық деректерге негізделген карта құрастыру, деформация жылдамдығын бағалау және қауіпті аймақтарды анықтау – зерттеу жұмысының негізгі нәтижелерінің бірі болып табылады.

Кеңқияқ кен орнындағы деформациялық процестерді бағалау үшін Sentinel-1 спутнигінің 2016–2020 жылдар аралығындағы суреттері SBAS-InSAR және 2D-декомпозиция әдістерімен өңделді. Бұл әдістер шөгу мен көтерілу ошақтарының нақты координаталарын анықтап, оларды мұнай өндіру және сұйықтық айдау процестерімен салыстыруға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижесінде кейбір деформациялар техногендік факторлармен, ал кейбірі тектоникалық құрылымдармен байланысы бар екені дәлелденді.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, мұнай қабаттарына судың белсенді айналуы кейбір нүктелерде (P1, P2) жылдық көтерілу жылдамдығының 160 мм/жылға дейін жетуіне себеп болған. Сонымен қатар, басқа нүктелерде (P6) деформация кері үрдіс – шөгу – түрінде байқалды. Бұл құбылыстар InSAR технологиясының нақты әрі сенімді мониторинг құралы екендігін көрсетті.

InSAR технологиясының көмегімен алынған деректер негізінде құрастырылған геодинамикалық қауіп карталары шөгу ошақтарының өндірістік инфрақұрылымдарға және маңызды көлік желілеріне (G217 тас жолы) жақын орналасқанын көрсетті. Бұл мәліметтер инженерлік қорғау, қауіпті аймақтардағы құрылыс жұмыстарын жоспарлау және инфрақұрылымдық қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін маңызды болып табылады.

Зерттеу барысында интерферометриялық өлшеулердің сапасына әсер ететін факторлар, соның ішінде тропосфералық әсерлер мен когеренттілік деңгейі, егжей-тегжейлі қарастырылып, түзету әдістері қолданылды. WRF моделіне негізделген тропосфералық түзетулер InSAR мәліметтерінің дәлдігін арттыруға мүмкіндік берді.

Жалпылай алғанда, бұл жұмыс Кеңқияқ мұнай кен орны аумағындағы жер қыртысының қозғалысын мониторингтеудің ғылыми-тәжірибелік маңыздылығын дәлелдей отырып, InSAR технологиясының мұнай-газ секторындағы геодинамикалық процестерді басқарудағы үлкен әлеуетін көрсетті. Алынған нәтижелер табиғи және техногендік қауіптердің алдын алу, инфрақұрылымды тиімді қорғау және болашақ геоақпараттық шешімдерді қабылдау үшін сенімді негіз болып табылады.

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

- 1 Қазақстан Республикасының Жер кодексі. – Астана: ҚР Әділет министрлігі, 2003.
- 2 Қазақстан Республикасының Экологиялық кодексі. – Астана: 2021.
- 3 Есенгельдинов Ж.А., Оспанов М.Б. InSAR технологиясын қолдану арқылы геодинамикалық бақылау // Геология және минералды ресурстар. – 2022. – №4.
- 4 Байғабылов А.Б. Қашықтықтан зондтау әдістері. – Алматы: Қазақ университеті, 2019.
- 5 Сейітов Қ.К. Мұнай кен орындарын игеру кезінде экологиялық қауіпсіздік. – Атырау: Х. Досмұхамедов ат. АМУ, 2020.
- 6 Grützner C., et al. Active faulting and seismic hazard in the Tien Shan, Central Asia. // *Geophysical Journal International*. – 2017. – Vol. 209(3).
- 7 Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2001. – Vol. 38(5).
- 8 Massonnet D., Feigl K. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. // *Reviews of Geophysics*. – 1998.
- 9 Hanssen R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- 10 Gabriel A., Goldstein R., Zebker H. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. // *Journal of Geophysical Research*. – 1989.
- 11 Xu W., et al. Spatiotemporal subsidence characterization using InSAR time series: A case study in oilfields. // *Remote Sensing of Environment*. – 2018.
- 12 Шойынбаев Б.Б. Мұнай-газ саласындағы мониторинг жүйелері. – Астана: ЕНУ баспасы, 2021.
- 13 Wadge G., et al. Satellite radar interferometry of volcanoes. // *Geological Society of London, Special Publications*. – 2002.
- 14 Kampes B.M. Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. – Springer, 2006.
- 15 Galloway D.L., Hudnut K.W. Land subsidence in the United States. – USGS Circular 1182. – 1999.
- 16 Crosetto M., et al. Urban subsidence monitoring using InSAR techniques: a case study of Barcelona. // *Journal of Applied Geophysics*. – 2005.
- 17 Ketelaar G. Monitoring surface deformation using satellite radar interferometry. – Springer, 2009.
- 18 Osnovnye problemy geodinamiki i seysmicheskoy opasnosti Tsentralnoy Azii. // Nauka, 2010.
- 19 Мухамеджанов С.С., Садуакасова Г.Б. Геодинамикалық қауіп карталарын жасау әдістемесі. – Алматы: ҚазҰТЗУ, 2022.
- 20 Sentinel-1 User Guide. – European Space Agency (ESA). <https://sentinel.esa.int>

- 21 Zebker H., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. // IEEE Transactions. – 1992.
- 22 Hooper A., Zebker H.A., et al. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis. // Journal of Geophysical Research. – 2004.
- 23 Qiu Q., et al. Monitoring subsidence induced by oil extraction using Sentinel-1 InSAR data. // Remote Sensing. – 2017.
- 24 Alkhasov A.B. Геоэкология нефтяных месторождений. – Москва: Недра, 2005.
- 25 Ляпустин В.И. Методы дистанционного зондирования Земли. – Москва: Академкнига, 2012.
- 26 WRF-ARW v4 Modeling System User's Guide. – NCAR, 2021.
- 27 Biggs J., et al. InSAR observations of deformation in volcanic regions. // Journal of Volcanology. – 2007.
- 28 Жандосов А.Б., Мұқанов С.Т. Мұнай өңірлеріндегі экологиялық өзгерістерді бағалау. – Атырау, 2020.
- 29 Gomba G., et al. Toward operational tropospheric correction services for Sentinel-1 InSAR data. // Remote Sensing. – 2016.
- 30 Мақсатов Е.М., Төлеуов Н.К. Геодезиялық мониторинг және спутниктік бақылау әдістері. – Алматы: Полиграфкомбинат, 2021.
- 31 Касымов А.К. Тектоникалық қозғалыстар және оларды бақылау әдістері. – Алматы, 2019.
- 32 Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. // Inverse Problems. – 1998.
- 33 Marinkovic P., Larsen Y. Consequences of long-term mining activities on surface subsidence. // Remote Sensing of Environment. – 2013.
- 34 Оздоев И.М. Основы интерферометрии и ее применение в геодинимике. – Москва: МГУ, 2015.
- 35 Тілеуова Г.К., Сапаров Ж.Т. Инженерлік геология және сейсмология. – Алматы: ҚазҰТЗУ, 2018.
- 36 Ng A.H.M., Ge L. InSAR and GPS monitoring of ground deformation in mining environments. // Journal of Surveying Engineering. – 2011.
- 37 Doin M.P., et al. A methodology for monitoring large-scale ground deformation using radar interferometry: application to earthquakes and oil extraction. // Geophysical Journal International. – 2009.
- 38 Бергенгалиев А., Байгурын Ж. «Кен орындарының жер бетіні деформациясын болжауға арналған регрессиялық модельдердің құрастыру» ; Международная научно-техническая конференция Theoretical Hypotheses and Empirical Results, №10 ISBN 978-7-3290-0657-9, страницы 413-419
- 39 Ш. К. Айтказинова, Ж. Д. Байгурын, Ж. Г. Адилов, А. Б. Бергенгалиев «Геодинамический мониторинг на месторождении Кенкияк» (Республика Казахстан) ; Журнал «Маркшейдерия и недропользование», выпуск ISSN 2079-3332, №2, 2024 год, страницы 62-68

А Қосымшасы

Кенқияқ кен орнындағы InSAR бойынша толық деформация кестесі

Нүкте ID	Орналасқан жері (коорд.)	Жылдық шөгу жылдамдығы (мм/жыл)	Жылдық көтерілу жылдамдығы (мм/жыл)	Қозғалыс типі	Болжамды себеп
K1	48.05°N, 57.20°E	-65.0	5.0	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K2	48.06°N, 57.21°E	-40.0	0.0	Шөгу	Интенсивті өндіру
K3	48.04°N, 57.19°E	-15.0	3.0	Аралас	Гидродинамикалық әсер
K4	48.07°N, 57.22°E	-80.0	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K5	48.08°N, 57.24°E	-20.0	8.0	Аралас	Флюид айдау әсері
K6	48.09°N, 57.25°E	-95.0	0.0	Шөгу	Жер асты шөгуі
K7	48.0262°N, 57.2399°E	-99.4	2.7	Аралас	Интенсивті өндіру
K8	48.0324°N, 57.2108°E	-96.8	1.3	Аралас	Жер асты шөгуі
K9	48.0696°N, 57.2623°E	-75.3	0.0	Шөгу	Жер асты шөгуі
K10	48.0562°N, 57.2313°E	-101.0	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K11	48.0865°N, 57.2306°E	-70.0	5.5	Аралас	Флюид айдау әсері
K12	48.0359°N, 57.2242°E	-29.6	0.0	Шөгу	Қабат қысымының төмендеуі
K13	48.0725°N, 57.1906°E	-38.4	2.9	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K14	48.0672°N, 57.2447°E	-92.1	2.9	Аралас	Жер асты шөгуі
K15	48.0251°N, 57.2637°E	-55.1	5.2	Аралас	Интенсивті өндіру
K16	48.0117°N, 57.2372°E	-75.9	0.0	Шөгу	Гидродинамикалық әсер
K17	48.0332°N, 57.2634°E	-61.6	6.4	Аралас	Флюид айдау әсері
K18	48.0176°N, 57.2353°E	-87.3	9.9	Аралас	Гидродинамикалық әсер
K19	48.0121°N, 57.2633°E	-113.0	6.0	Аралас	Флюид айдау әсері
K20	48.0477°N, 57.1954°E	-106.0	6.4	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K21	48.0515°N, 57.245°E	-56.6	0.0	Шөгу	Гидродинамикалық әсер

K22	48.0587°N, 57.1932°E	-76.9	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K23	48.0104°N, 57.2523°E	-92.1	7.7	Аралас	Жер асты шөгуі
K24	48.0599°N, 57.2115°E	-64.4	3.8	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K25	48.0346°N, 57.2439°E	-19.9	0.0	Шөгу	Интенсивті өндіру
K26	48.0145°N, 57.2049°E	-107.8	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K27	48.0711°N, 57.2252°E	-62.6	1.8	Аралас	Интенсивті өндіру
K28	48.0726°N, 57.1991°E	-56.3	0.0	Шөгу	Гидродинамикалық әсер
K29	48.0366°N, 57.2333°E	-56.7	6.9	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K30	48.0504°N, 57.2°E	-37.8	0.0	Шөгу	Флюид айдау әсері
K31	48.0567°N, 57.2689°E	-43.7	0.0	Шөгу	Флюид айдау әсері
K32	48.0827°N, 57.2108°E	-30.7	5.0	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K33	48.0372°N, 57.2195°E	-95.0	0.0	Шөгу	Интенсивті өндіру
K34	48.0751°N, 57.2465°E	-40.3	2.8	Аралас	Гидродинамикалық әсер
K35	48.0265°N, 57.2653°E	-15.3	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K36	48.0809°N, 57.1906°E	-36.7	0.0	Шөгу	Флюид айдау әсері
K37	48.0523°N, 57.2161°E	-79.2	0.0	Шөгу	Интенсивті өндіру
K38	48.0106°N, 57.2159°E	-70.2	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K39	48.0182°N, 57.2557°E	-15.3	0.0	Шөгу	Флюид айдау әсері
K40	48.0222°N, 57.2399°E	-83.4	0.0	Шөгу	Қабат қысымының төмендеуі
K41	48.0578°N, 57.1972°E	-20.5	0.0	Шөгу	Жер асты шөгуі
K42	48.0566°N, 57.2024°E	-21.3	7.5	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K43	48.0609°N, 57.2121°E	-51.8	7.4	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K44	48.0197°N, 57.2157°E	-89.3	0.0	Шөгу	Жер асты шөгуі
K45	48.0512°N, 57.2283°E	-50.5	5.2	Аралас	Жер асты шөгуі
K46	48.0363°N, 57.2016°E	-11.8	0.0	Шөгу	Қабат қысымының төмендеуі

K47	48.0111°N, 57.2171°E	-27.2	0.0	Шөгу	Флюид айдау әсері
K48	48.0151°N, 57.2075°E	-27.3	1.5	Аралас	Жер асты шөгуі
K49	48.0297°N, 57.2181°E	-79.2	9.6	Аралас	Интенсивті өндіру
K50	48.0101°N, 57.265°E	-24.9	3.4	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K51	48.0331°N, 57.2166°E	-19.3	7.2	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K52	48.019°N, 57.213°E	-109.3	0.0	Шөгу	Гидродинамикалық әсер
K53	48.0156°N, 57.2403°E	-69.7	8.3	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K54	48.0814°N, 57.1955°E	-104.3	0.0	Шөгу	Флюид айдау әсері
K55	48.0383°N, 57.223°E	-17.7	0.0	Шөгу	Интенсивті өндіру
K56	48.0271°N, 57.2312°E	-96.5	0.0	Шөгу	Қабат қысымының төмендеуі
K57	48.0552°N, 57.2321°E	-39.8	8.7	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K58	48.0434°N, 57.2078°E	-51.2	8.2	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K59	48.0601°N, 57.2013°E	-82.0	1.2	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K60	48.0685°N, 57.2162°E	-95.6	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K61	48.0284°N, 57.2573°E	-113.3	8.9	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K62	48.0551°N, 57.2534°E	-32.3	0.2	Аралас	Гидродинамикалық әсер
K63	48.0701°N, 57.213°E	-59.8	0.0	Шөгу	Жер асты шөгуі
K64	48.0831°N, 57.23°E	-35.3	4.2	Аралас	Флюид айдау әсері
K65	48.0169°N, 57.2209°E	-115.2	0.0	Шөгу	Флюид айдау әсері
K66	48.0823°N, 57.2585°E	-16.7	1.8	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K67	48.0495°N, 57.221°E	-25.6	0.0	Шөгу	Интенсивті өндіру
K68	48.0778°N, 57.2058°E	-17.5	8.4	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K69	48.0707°N, 57.2531°E	-76.2	0.0	Шөгу	Гидродинамикалық әсер
K70	48.0412°N, 57.269°E	-37.2	9.3	Аралас	Жер асты шөгуі
K71	48.052°N, 57.2453°E	-18.3	0.8	Аралас	Интенсивті өндіру

K72	48.01°N, 57.2334°E	-103.5	6.6	Аралас	Флюид айдау әсері
K73	48.0541°N, 57.2089°E	-57.2	0.0	Шөгу	Интенсивті өндіру
K74	48.0741°N, 57.2165°E	-36.3	10.0	Аралас	Интенсивті өндіру
K75	48.0671°N, 57.2076°E	-49.7	0.2	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K76	48.0226°N, 57.2606°E	-24.1	9.7	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K77	48.0841°N, 57.2031°E	-119.7	5.8	Аралас	Гидродинамикалық әсер
K78	48.0381°N, 57.204°E	-11.1	2.5	Аралас	Интенсивті өндіру
K79	48.0172°N, 57.2542°E	-11.7	3.8	Аралас	Интенсивті өндіру
K80	48.0458°N, 57.1978°E	-16.0	8.8	Аралас	Интенсивті өндіру
K81	48.0861°N, 57.2207°E	-115.6	3.3	Аралас	Жер асты шөгуі
K82	48.0609°N, 57.2598°E	-26.4	7.0	Аралас	Жер асты шөгуі
K83	48.043°N, 57.213°E	-112.8	0.0	Шөгу	Жер асты шөгуі
K84	48.0589°N, 57.2132°E	-55.4	0.0	Шөгу	Қабат қысымының төмендеуі
K85	48.0638°N, 57.2481°E	-28.7	0.0	Шөгу	Гидродинамикалық әсер
K86	48.0595°N, 57.2067°E	-43.6	0.2	Аралас	Гидродинамикалық әсер
K87	48.0389°N, 57.1915°E	-97.5	0.5	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K88	48.0105°N, 57.26°E	-31.9	2.0	Аралас	Қабат қысымының төмендеуі
K89	48.0497°N, 57.2089°E	-90.8	2.0	Аралас	Флюид айдау әсері
K90	48.0271°N, 57.2333°E	-17.4	8.6	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K91	48.0542°N, 57.2187°E	-87.4	0.0	Шөгу	Қабат қысымының төмендеуі
K92	48.0777°N, 57.2494°E	-74.5	9.7	Аралас	Интенсивті өндіру
K93	48.0561°N, 57.2571°E	-17.8	2.6	Аралас	Жер асты шөгуі
K94	48.0237°N, 57.1975°E	-107.6	0.0	Шөгу	Жер асты шөгуі
K95	48.0851°N, 57.2593°E	-75.0	0.0	Шөгу	Гидродинамикалық әсер
K96	48.0283°N, 57.2511°E	-80.8	8.3	Аралас	Жер асты шөгуі

K97	48.0355°N, 57.209°E	-70.7	9.7	Аралас	Интенсивті өндіру
K98	48.0458°N, 57.2345°E	-30.2	8.7	Аралас	Жер асты шөгуі
K99	48.0608°N, 57.2144°E	-44.4	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K100	48.0301°N, 57.2611°E	-97.5	0.0	Шөгу	Флюид айдау әсері
K101	48.0514°N, 57.2519°E	-106.2	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K102	48.0261°N, 57.2612°E	-61.1	0.0	Шөгу	Қабат қысымының төмендеуі
K103	48.0119°N, 57.2353°E	-97.6	4.9	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K104	48.0243°N, 57.2236°E	-10.4	0.0	Шөгу	Интенсивті өндіру
K105	48.0309°N, 57.2606°E	-96.7	1.8	Аралас	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K106	48.0227°N, 57.1913°E	-116.4	2.5	Аралас	Жер асты шөгуі
K107	48.0856°N, 57.2346°E	-106.4	0.0	Шөгу	Ұңғымалық жұмыстар әсері
K108	48.0393°N, 57.2041°E	-65.3	7.6	Аралас	Жер асты шөгуі

Бергенғалиев Акежан Бериктасовичтың «Радарлық интерферометрия әдістерінің негізінде қозғалыстардың қауіпті учаскелерінің карталарын құру» атты 7M07306 – Геокеңістіктік цифрлық инженерия білім беру бағдарламасы бойынша магистр дәрежесін алу үшін дайындаған магистерлік диссертациясына рецензенттің

ПІКІРІ

Магистрант Бергенғалиев Акежан Бериктасовичтің диссертациялық жұмысы геодинамикалық қауіпті аймақтарды бағалау мен картаға түсіру мақсатында заманауи қашықтықтан зондтау әдістерінің бірі — радарлық интерферометрия (InSAR) технологиясын қолдануға арналған.

Зерттеу барысында Sentinel-1 спутнигінің көпжылдық деректері негізінде Кеңқияқ кен орны аумағындағы жер қыртысы қозғалыстарының динамикасы зерттеліп, қауіпті учаскелер анықталған. Диссертацияда интерферометриялық өңдеудің барлық кезеңдері (фазаны тарқату, когеренттілікті бағалау, атмосфералық түзетулер және визуализация) толықтай қамтылып, алынған нәтижелер картографиялық өнімдер мен графикалық сызбалар түрінде ұсынылған.

Тақырыптың өзектілігі өте жоғары. Жұмыс құрылымы логикалық жағынан жүйелі, теориялық-әдістемелік және практикалық бөлімдер бір-бірін толықтырып тұр. Инженерлік тұрғыдан күрделі және заманауи InSAR әдістерін меңгеруі, олардың нақты аумақтық мысалдарда (Кеңқияқ кен орны) қолданылуы жұмыстың ғылыми және практикалық құндылығын арттыра түседі.

Жекелеген стилистикалық және тілдік тұстарда аздаған ескертулер болғанымен, олар жалпы жұмыстың сапасына әсер етпейді. Нәтижелер сенімді, пайдаланылған әдістемелер ғылыми негізделген, мәліметтер өңделуі – қазіргі талаптарға сай.

Қорытындылай келе, Бергенғалиев Акежан Бериктасовичтің магистрлік диссертациялық жұмысы 7M07306 – Геокеңістіктік цифрлық инженерия білім беру бағдарламасының талаптарына толықтай сай келеді және ғылыми-практикалық тұрғыдан жоғары деңгейде орындалған деп есептеймін. Жұмысты 95%-ға өте жақсы деп бағалай отырып, авторға магистр академиялық дәрежесін беруге ұсынамын.

Рецензент,
Т.ғ.к., профессор
«24» 06 2025ж.



Омиржанова Ж.Т.

Бергенғалиев Акежан Бериктасовичтың «Радарлық интерферометрия әдістерінің негізінде қозғалыстардың қауіпті учаскелерінің карталарын құру» атты 7М07306 – Геокеңістіктік цифрлық инженерия білім беру бағдарламасы бойынша магистр дәрежесін алу үшін дайындаған магистрлік диссертациясына

ПІКІР

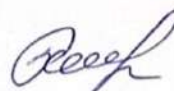
Магистранттың «Радарлық интерферометрия әдістерінің негізінде қозғалыстардың қауіпті учаскелерінің карталарын құру» тақырыбындағы диссертациялық жұмысы техногендік және табиғи деформацияларды ерте анықтауға бағытталған заманауи ғарыштық технологияларды қолдану арқылы геодинамикалық қауіптерді бағалаудың өзекті мәселелерін ғылыми-тәжірибелік тұрғыдан қарастырады.

Жұмыста Sentinel-1 спутниктік деректері мен InSAR технологиясының мүмкіндіктері тиімді пайдаланыла отырып, Кеңқияқ кен орны аумағындағы жер қыртысының қозғалыстары анықталып, қауіпті аймақтар карта түрінде көрнекілендірілген. Интерферометриялық өндеудің толық алгоритмі (когеренттілік карталары, фазаны тарқату, атмосфералық түзетулер) егжей-тегжейлі сипатталып, алынған нәтижелер жоғары деңгейде өңделген.

Магистрант өз жұмысын орындау барысында дербестік, ғылыми сауаттылық және әдіснамалық дайындық танытты. InSAR деректерін өндеу үшін заманауи бағдарламалық қамтамасыз ету құралдарын (SNAP, QGIS және т.б.) еркін меңгерген. Ғылыми тұжырымдар нақты, зерттеу нәтижелері инженерлік қолданбалы маңызға ие.

Жалпы, Бергенғалиев Акежан Бериктасовичтің магистрлік диссертациясы қойылған мақсат пен міндеттерге толық сәйкес келеді, өзектілігі жоғары, ғылыми жаңалығы бар, практикалық нәтижелері нақты іске асырылуға жарамды. Жұмыс мазмұны мен құрылымы магистрлік талаптарға сай. Ізденуші ғылыми ізденіс пен технологиялық тұрғыда жетілген біліктілік деңгейін көрсете алған. Диссертациялық жұмысты 95%-ға өте жақсы деп бағалап, авторға магистр академиялық дәрежесін беруге ұсынамын.

Ғылыми жетекші
ҚазҰТЗУ, МІЖГ кафедрасының
профессоры, т.ғ.д.
«24» маусым 2025 ж.



Байгурин Ж.Д.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Бергенгалиев Акежан Бериктасович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Радарлық интерферометрия әдістерінің негізінде қозғалыстардың қауіпті учаскелерінің карталарын құру

Научный руководитель: Жаксыбек Байгурин

Коэффициент Подобия 1: 0.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 23.06.



Заведующий кафедрой

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Бергенгалиев Акежан Бериктасович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Радарлық интерферометрия әдістерінің негізінде қозғалыстардың қауіпті учаскелерінің карталарын құру

Научный руководитель: Жаксыбек Байгурин

Коэффициент Подобия 1: 0.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из других алфавитов: 2

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 23.06.



проверяющий эксперт

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

№ 2, март-апрель 2024 г.

www.n-gn.ru

«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»
«Mine Surveying and Subsurface Use»

90 ЛЕТ

КАФЕДРЕ «МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА И ГЕОДЕЗИИ»

КазНТУ имени К.И. Сатпаева



СӘТБАЕВ
УНИВЕРСИТЕТІ



SATBAYEV
UNIVERSITY



№2(130)

март-апрель 2024 г.



Учредитель журнала
Общество с ограниченной
ответственностью
«Издательский дом
«Недропользование и горные науки»

Редакционный совет

Г. И. Айнбиндер – ООО «АГЭП», Москва
И. И. Айнбиндер – ИПКОН РАН, Москва
А. А. Барях – ПФИЦ УрО РАН, Пермь
В. М. Вернигор – АО «Технологии контроля безопасности», Москва
В. И. Голик – ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», Владикавказ
В. А. Гордеев – ООО «Союз маркшейдеров России», Москва
В. В. Грицков – ООО «Союз маркшейдеров России», Москва
В. А. Дрибан – РАНМИ, Донецк
А. А. Добрынин – ИПКОН РАН, Москва
В. Н. Захаров – ИПКОН РАН, Москва
В. А. Игнаткина – НИТУ «МИСиС», Москва
Г. В. Калабин – ИПКОН РАН, Москва
Д. Р. Каплунов – ИПКОН РАН, Москва
Н. М. Качурин – ТулГУ, Тула
Р. В. Ключев – СКГМИ (ГТУ), Владикавказ
С. Б. Кулибаба – ИПКОН РАН, Москва
В. В. Куликов – МГРИ, Москва
Л. Ш. Махмудова – ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллион-шикова», Грозный
Н. В. Милетенко – Минприроды РФ, Москва
М. Б. Носырев – Екатеринбург
В. Н. Одинцев – ИПКОН РАН, Москва
В. Д. Пропп – ФГБОУ ВО «УГГУ», Екатеринбург
И. А. Пыталев – МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск
Х. Э. Таймасханов – ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллион-шикова», Грозный
К. Н. Трубецкой – ИПКОН РАН, Москва
М. А. Тюленев – КузГТУ, Кемерово
А. А. Хорешок – КузГТУ, Кемерово
В. А. Чантурия – ИПКОН РАН, Москва

Издатель:

ООО «Издательский дом «Недропользование и горные науки»
Адрес редакции и издателя:
117647, ул. Академика Капицы, д. 26, 1.
Тел.: +7(915) 111 0386
E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru
http://www.n-gn.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83630 от 26.07.2022 г.

По решению ВАК журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук по разработке месторождений полезных ископаемых и по наукам о Земле

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ и в Российский индекс научного цитирования.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

© Маркшейдерия и недропользование



В ЭТОМ НОМЕРЕ:

90 ЛЕТ КАФЕДРЕ «МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА И ГЕОДЕЗИИ» КазНИТУ ИМЕНИ К. И. САТПАЕВА

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Журнал издается с 2001 года

Редакция:

Главный редактор
Ю. В. Дмитрак
Заместитель главного редактора
В. Н. Хетагуров
Ведущий редактор
Н. А. Федотенко
Ученый секретарь
Н. А. Милетенко
Верстка и дизайн
Н. Р. Алкснитис
Помощник главного редактора
Б. Н. Пашичев

Подписной индекс издания
в каталоге «Урал-Пресс»,
в объединенном каталоге АРЗИ
«Пресса России» – 88016

В течение года можно произвести подписку на журнал непосредственно в редакции

За точность приведенных сведений и содержание данных, не подлежащих открытой публикации, несут ответственность авторы

При перепечатке ссылка на журнал «Маркшейдерия и недропользование» обязательна

Журнал отпечатан в типографии
«CLUB PRINT»
тел.: +7(495) 669 5009

ISSN 2079-3332



24 002



СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

90 лет кафедре «Маркшейдерского дела и геодезии»
КазНТУ имени К. И. Сатпаева

90 years of the Department of Mine Surveying and Geodesy of
KazNRTU named after K. I. Satpayev

- М. М. Бегентаев*
Семь великих свершений Сатпаева
M. M. Begentayev
Seven great things Satpayev 4
- М. Б. Нурпеисова*
Во всех сферах деятельности кафедры — космическая
точность
M. B. Nurpeisova
In all fields of activity of the department — cosmic precision 7
- К. Б. Рысбеков, С. Б. Касенова, К. Б. Ауесхан, А. Б. Тойшы*
Составление карты динамики растительного покрова
по данным дистанционного зондирования Земли
K. B. Rysbekov, S. B. Kasenova, K. B. Aueskhan, A. B. Toishy
Drawing up a map of vegetation dynamics based on Earth
remote sensing data 10
- Т. Б. Нурпеисова, А. Е. Орманбекова, Т. С. Сагит, М. Е. Бертус*
Обработка результатов GPS-мониторинга при
интенсивных движениях земной коры в сейсмоактивных
регионах Казахстана
T. B. Nurpeisova, A. E. Ormanbekova, T. S. Sagit, M. E. Bertus
Processing of GPS-monitoring results during intensive
movements of the earth's crust in seismically active regions
of Kazakhstan 14
- М. Б. Нурпеисова, Г. С. Сердалина, И. М. Бородин, Ф. А. Калабаев*
Инновационные методы маркшейдерских съемок при
освоении хромитовых месторождений
M. B. Nurpeisova, G. S. Serdalina, I. M. Borodina, F. A. Kalabaev
Innovative methods of surveying surveys during the
development of chromite deposits 20
- Г. М. Кыргызбаева, М. Д. Исагазы, Д. М. Кыргызбаева,*
А. Ж. Санатова
Исследование физико-механических свойств горного
массива при освоении недр
G. M. Kirgizbayeva, M. D. Isagazy, D. M. Kirgizbaeva,
A. Zh. Sanatova
Investigation of the physical and mechanical properties of the
mountain massif during the development of the subsoil 29
- М. Б. Нурпеисова, Ж. М. Нукарбекова, Н. Д. Торехан,*
Б. А. Елеусинова
Совершенствование геодезических методов мониторинга
земной поверхности при освоении недр
M. B. Nurpeisova, Zh. M. Nukarbekova, N. D. Torekhan,
B. A. Eleusinova
Improvement of geodesic methods monitoring the earth's
surface during subsoil development 35

- С. Т. Солтабаева, А. М. Абдыбек, Н. Б. Ахмет, А. Н. Амангелди*
Мониторинг подземных рельсовых путей Алматинского
метрополитена
S. T. Soltabaeva, A. M. Abdybek, N. B. Akhmet, A. N. Amangeldi
Monitoring of underground rail tracks of the Almaty metro 40
- А. Т. Салкынов*
Знание, опыт, ответственность за порученное дело — залог
успеха работы компании
A. T. Salkynov
Knowledge, experience, responsibility for the assigned task is the
key to the success of the company's work 46
- Г. С. Мадимарова, Т. Нурланкызы, Д. Н. Сулейменова,*
Ш. А. Жантуева
Изучение физико-механических свойств пород
месторождения бассейна Каратау
G. S. Madimarova, T. Nurlankyzy, D. N. Suleimenova,
Sh. A. Zhantueva
Study of physical and mechanical properties of rocks
of deposits of the Karatau basin 50
- Х. М. Касымканова, С. Б. Юсупов, О. Байтурбай,*
М. М. Оразымбет
Наблюдения за деформациями сооружений в зоне
строительства метрополитена г. Алматы
Kh. M. Kasymkanova, S. B. Yusupov, O. Baiturbay,
M. M. Orazymbet
Observations of deformations of structures in the Almaty
metro construction zone 56
- Ш. К. Айтказинова, Ж. Д. Байгулин, Ж. Г. Адилев,*
А. Б. Бергенгалиев
Геодинамический мониторинг на месторождении
Кенкиек (Республика Казахстан)
Sh. K. Aitkazanova, Zh. D. Baigurin, J. G. Adilov, A. B. Bergengaliyev
Geodynamic monitoring on Kenkiyak field (Republic
of Kazakhstan) 62
- А. А. Мамытов, А. А. Токтаров, С. С. Абдыгалиева, О. Байтурбай*
Применение дистанционного зондирования Земли
и геоинформационных систем в обеспечении
цифровизации сельского хозяйства Республики Казахстан
A. A. Mamytov, A. A. Toktarov, S. S. Abdygalieva, O. Baiturbai
The use of remote sensing and GIS to ensuring digitalization
agriculture of the Republic of Kazakhstan 69
- М. Д. Исагазы*
Состояние и перспективы маркшейдерских работ
на руднике «Жыланды»
M. D. Isagazy
The state and prospects of surveying at the «Zhylandy» mine 75

Наши юбилеры

Our anniversaries

- 50 лет Мейраму Мухаметрахимовичу Бегентаеву
50 years of Meyram Mukhametovich Begentayev 80
- Поздравляем Маржан Байсановну Нурпеисову с Днем
рождения
87 years of Marzhan Baysanovna Nurpeisova 81
- «Лучший преподаватель вуза 2023»
«The best university teacher 2023» 82

главная новости обозрение статьи выпуски журнала информация о журнале контакты

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
журнал

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

№ 1 (129) 2024 г № 2 (130) 2024 г № 3 (131) 2024 г № 4 (132) 2024 г

(915) 111-03-86

НА НАШЕМ САЙТЕ:

краткий обзор статей, анонс профильных мероприятий, новости недропользования,
памятные даты и многое другое

www.n-gn.ru

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ КЕНКИЯК (РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН)

*Ш. К. Айтказинова, Ж. Д. Байгурун, Ж. Г. Адилев, А. Б. Бергенгалиев,
Казахский национальный исследовательский технический университет (КазННТУ) имени К. И. Сатпаева,
г. Алматы, Республика Казахстан*

Аннотация: Работа направлена на создание комплексной системы геодинамического мониторинга с целью контроля современных деформаций земной поверхности, которые могут возникнуть как под воздействием природных явлений, так и в результате технологических процессов на Кенкиякском нефтегазовом месторождении. Данный мониторинг также помогает предсказать потенциальные негативные последствия и обеспечить промышленную и экологическую безопасность при добыче полезных ископаемых.

Ключевые слова: месторождение, деформационные процессы, мониторинг, нивелирование, GNSS-измерения, прогноз, InSAR, дистанционное зондирование.

Для цитирования: Айтказинова Ш. К., Байгурун Ж. Д., Адилев Ж. Г., Бергенгалиев А. Б. Геодинамический мониторинг на месторождении Кенкияк (Республика Казахстан) // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 2. С. 62-68. DOI: 10.56195/20793332_2024_2_62_68.

GEODYNAMIC MONITORING ON KENKIYAK FIELD (REPUBLIC OF KAZAKHSTAN)

*Sh. K. Aitkazanova, Zh. D. Baigurin, J. G. Adilov, A. B. Bergengaliyev,
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan*

Abstract: The work is aimed at creating an integrated geodynamic monitoring system in order to control modern deformations of the earth's surface, which can occur both under the influence of natural phenomena and as a result of technological processes at the Kenkiyak oil and gas field. This monitoring also helps to predict potential negative consequences and ensure the industrial and environmental safety of mining.

Keywords: deposit, deformation processes, monitoring, leveling, GNSS measurements, forecast, InSAR, remote sensing.

For citation: Aitkazanova Sh. K., Baigurin Zh. D., Adilov J. G., Bergengaliyev A. B. Geodynamic monitoring on Kenkiyak field (Republic of Kazakhstan). Surveying and subsoil use. 2024;(2):62-68. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_2_62_68.

Целью данного исследования является обеспечение комплексной безопасности систем и объектов на месторождении Кенкияк (Республика Казахстан). Безопасность охватывает не только аспекты промышленности, но также относится к экологическим и геодинамическим аспектам. Для достижения этой цели предлагается использовать многофункциональный мониторинг природных и природно-технологических сейсмических и деформационных процессов [1].

В рамках комплексного контроля геодинамического состояния недр на месторождении Кенкияк выделяются такие задачи, как:

- ✧ организация и периодический мониторинг текущих деформационных процессов в геологической среде, что включает в себя наблюдение за изменениями в структуре и состоянии недр;
- ✧ своевременное обнаружение аномальных геодинамических процессов, которые могут иметь природное

(тектогенное) происхождение, а также техногенное происхождение. Это важно для предупреждения потенциальных рисков и минимизации их негативных последствий [2];

- ✧ разработка и внедрение мероприятий, направленных на устранение факторов, воздействующих на геодинамическое состояние, с целью снижения риска и минимизации возможных негативных последствий. Эти мероприятия могут включать в себя изменения в технологических процессах и методах добычи [3];
- ✧ систематический сбор, обработка и долгосрочное хранение данных о геодинамическом состоянии компонентов геологической среды. Это важно для анализа и прогнозирования изменений в будущем;
- ✧ оценка недр и условий недропользования, что включает в себя оценку резервов, геологических условий и параметров месторождения [4].

Важно отметить, что перспективные и текущие задачи решаются в определенной последовательности и с учетом изменений в месторождении и геологических условиях. Это может включать в себя корректировки параметров, такие как бурение новых скважин, изменение пластового давления, объемов добычи и реагирование на деформированное состояние массива недр. Такой подход обеспечивает эффективное управление месторождением с учетом изменяющихся условий [5].

Материал и методы

Результаты комплексного геодинимического мониторинга служат фундаментом для разработки и применения различных методов, которые обеспечивают точное выявление и отслеживание ключевых геодинимических процессов.

Этот комплекс методов включает в себя:

- ✦ высокоточное нивелирование второго класса, способное обнаруживать интенсивные деформации в зонах разломов и изменения в высоте земной поверхности вдоль линий смещения;
- ✦ результаты высокоточных GPS-измерений, которые позволяют отслеживать вертикальное и горизонтальное перемещение горных массивов и следить за развитием процессов опускания и поднятия земной поверхности.

С 2010 года на территории месторождения Кенкияк проводятся исследования, направленные на оценку уровня и масштабов деформационных процессов природного и техногенного происхождения. Для этой цели применяются многократные высокоточные геодезические и геофизические измерения, проводимые на специально оборудованных точках геодинимического полигона, созданного на территории месторождения Кенкияк. С 2010 по 2022 год было проведено 14 циклов комплексного геодинимического мониторинга, а также использованы методы InSAR для дополнительной оценки динамики изменений на данной территории.

Результаты и обсуждение

Основные приоритетные результаты реализации программ комплексного геодинимического мониторинга недр на территории месторождения Кенкияк осуществлялись совместно с ТОО «Жаназол Мунай Сервис» с 2010 по 2022 год. Анализ организации геодинимического мониторинга недр на территории месторождения Кенкияк в целях обеспечения промышленной безопасности при использовании месторождения и предотвращения возможных геодинимических процессов с использованием полученной информации о текущем состоянии месторождения и возможной разработке геодинимических процессов в горных породах в виде вертикальных и горизонтальных смещений и деформаций позволяет осуществлять прогнозирование.

Для решения поставленной задачи была применена методика нивелирования II класса повышенной точности. Данная методика надежно выявляет существенные локальные аномалии современных вертикальных движений земной поверхности с амплитудами от 3–5 мм и выше. Также в относительной степени ускоряется процесс проведения нивелирования по профилям и полигонам. Такая методика обеспечивает высокую точность наблюдений. Средние квадратические случайные ошибки нивелирования – порядка плюс или минус 1,2–1,5 мм/км [6, 7].

Нивелирные наблюдения на месторождении Кенкияк организованы в форме шести профилей. Профили 1-1, 2-2, 3-3 и 4-4 пересекают все основные особенности карбонатного массива месторождения Кенкияк, в том числе они проходят по простиранию, а также вкост простиранию месторождения. Характерно то, что профили проложены через области максимальной добычи. Это позволяет оценивать аномальные деформации земной поверхности, обусловленные процессами разработки. На рисунке 1 (см. цветную вклейку на стр. 48) показано местоположение всех разломных зон по залежам месторождения и расположение наблюдательных пунктов.

Нивелирный профиль 1-1 проходит непосредственно по простиранию структуры Кенкияк-подсолевой (рис. 2). С северо-запада на юго-восток профиль 1-1 проходит через скважины № 105, 7001, 7031, 8057А, 8061, 8022, 8067А, 234, 8002, 8045. Общая протяженность профиля 1-1 составляет 10 км.

Как следует из анализа кривой нивелирования в период между осенью 2010 года и осенью 2011 года, временной интервал между измерениями составляет практически 1 год. Этот факт позволяет провести естественную селекцию возможных сезонных (зима – лето) деформаций земной поверхности и полагать, что данный фактор-помеха исключен из дальнейшего анализа. Морфологический анализ кривых показывает, что имеет место три аномалии типа γ в форме локального пикообразного оседания земной поверхности.

Первая аномалия (GN-27) типа γ имеет амплитуду порядка 14 мм и ширину 0,5 км. Среднегодовая относительная деформация составляет величину порядка $5,6 \times 10^{-5}$.

Вторая аномалия – с центром в районе репера GN-31. Эта аномалия типа γ с амплитудой порядка 17 мм и шириной 0,5 км. Величина среднегодовой относительной деформаций равна $6,8 \times 10^{-5}$.

Третья по порядку γ аномалия (GN-33) имеет амплитуду 40 мм и ширину около 0,6 км. Среднегодовая относительная деформация для данной аномалии чрезвычайно высока – $1,3 \times 10^{-4}$.

В период между осенью 2013 года и осенью 2014 года появляется еще одна аномалия типа γ (№ 4) – с центром в районе репера GN-17. Ее амплитуда составляет 18 мм, а ширина – порядка 0,6 км. Среднегодовая величина относительной деформации составляет 6×10^{-5} .

Кроме того, в период между осенью 2015 года и летом 2016 года появляются еще три аномалии типа γ : № 5, 6 и 7.

Пятая аномалия – с центром в районе репера GN-5 – имеет амплитуду порядка 60 мм и ширину около 0,9 км. Среднегодовая относительная деформация составляет величину порядка $1,3 \times 10^{-4}$.

Шестая по счету аномалия (GN-9) имеет амплитуду порядка 30 мм и ширину примерно 0,6 км. Среднегодовая относительная деформация составляет величину $1,0 \times 10^{-4}$.

Седьмая аномалия (GN-25) типа γ имеет амплитуду порядка 28 мм и ширину 0,6 км. Величина относительной деформации равна $\sim 1,0 \times 10^{-4}$.

И, наконец, восьмая по счету аномалия (GN-2) проявлялась между циклами осень 2019 года – лето 2020 года. Данная аномалия имеет амплитуду порядка 68 мм и ширину примерно 0,6 км. Среднегодовая относительная деформация этой

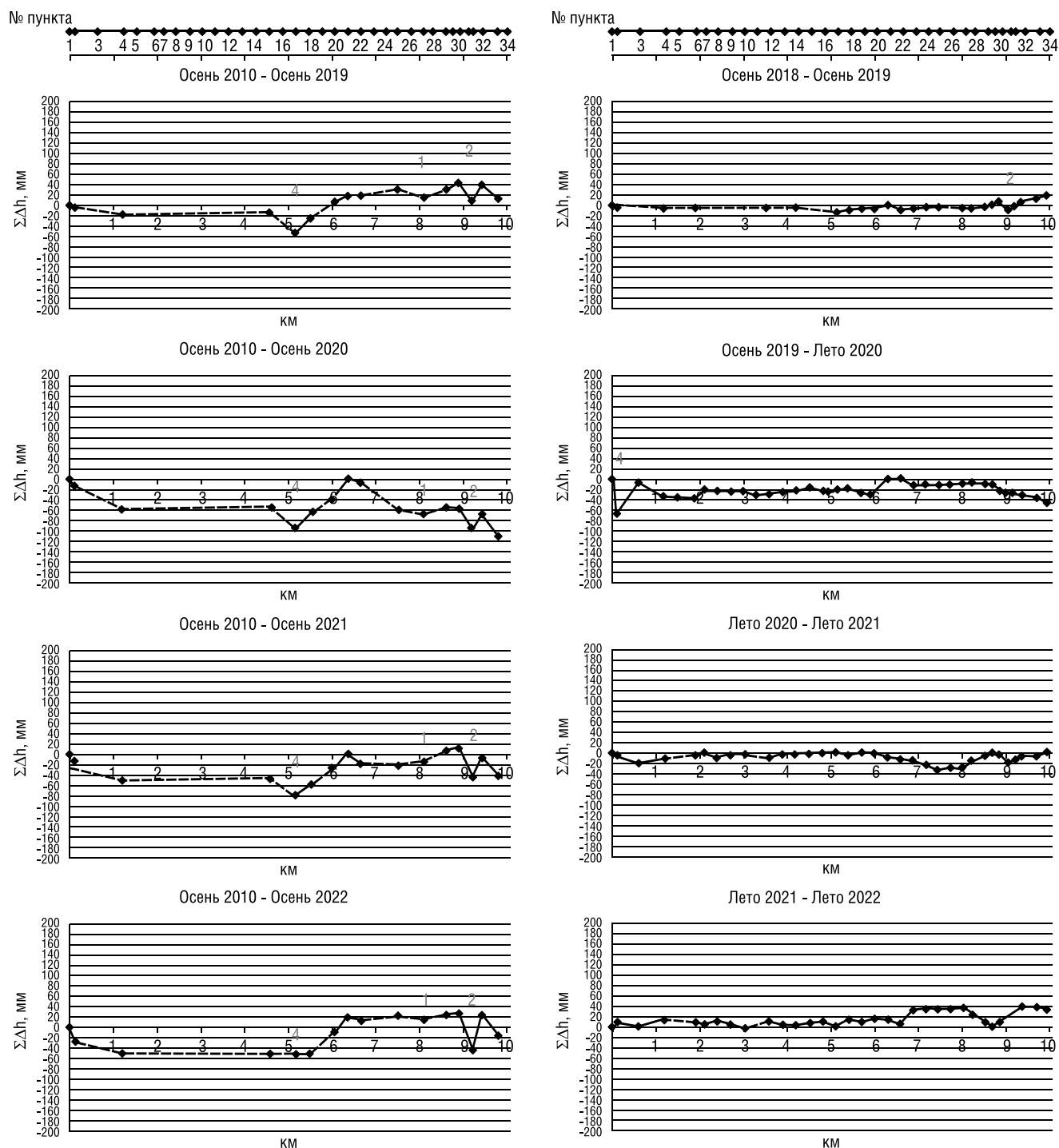


Рис. 2. Результаты повторных нивелирных наблюдений на профиле 1-1, представленные в «эволюционной» (слева) и «пульсационной» (справа) форме
 Fig. 2. The results of repeated leveling observations on profile 1-1, presented in the «evolutionary» (left) and «pulsation» (right) forms

аномалии чрезвычайно высока и составляет величину порядка $2,2 \times 10^{-4}$.

Существенно важную информацию для оценки развития аномалий во времени имеют «пульсационные» кривые. Совместный анализ кривых в циклах 2011-2012 годов, 2012-2013 годов, 2013-2014 годов, 2014-2015 годов, 2015-2016 годов, 2016-2017 годов, 2017-2018 годов и 2018-2019 годов указывает на то, что активно развивается во времени только аномалия № 1 (GN-27), № 2 (GN-31) и № 4 (GN-17). При этом видно, что в цикле 2016-2017 годов вновь продолжает развитие аномалия № 1. К 2017 году наблюдений амплитуда

аномалии № 1 (GN-27) составила 126 мм. Величина накопленной относительной деформации для данной аномалии высока — $5,0 \times 10^{-4}$. К 2019 году наблюдений амплитуды аномалий № 2 (GN-31) и № 4 (GN-17) составили 31 мм и 61 мм соответственно.

Результаты GPS-наблюдений

GPS-мониторинг проводится для оценки современного деформационного состояния недр месторождения Кенкияк. Для достижения высокой точности GPS-измерения осуществляются только относительным методом. Этот метод базируется на измерении направленного отрезка (вектора)

между фазовыми центрами антенн двух приемников, на основе набора сигналов, принятых от одного и того же набора спутников в течение интервала наблюдений. Применение относительного метода позволяет измерять линии с миллиметровой точностью. При этом используются только двухчастотные типы приемников, обеспечивающие возможность приема сигналов спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS (L1/L2/L5) и высокоточные антенны с горизонтальным отражателем для подавления многолучевости [8, 9].

GPS-наблюдения были выполнены на 35 пунктах, из них 3 – опорных пункта (GPS-5, GPS-18 и GPS-24), 32 – рядовых пункта. На *рисунке 3* (см. цветную вклейку на стр. 48) представлена схема фактического размещения GPS-пунктов на территории месторождения Кенкияк. Основная часть GPS-пунктов сосредоточена в пределах сводовой части месторождения с повышенными величинами эффективных нефтенасыщенных толщин. Часть GPS-пунктов размещена рядом с нивелирными пунктами, совмещенными с гравиметрическими.

По аналогии с анализом результатов повторного точного нивелирования были проанализированы графики изменения высот GPS-пунктов, полученные за период между циклом 1 (2010 г.) и циклом 14 (2022 г.). При построении графиков высот были использованы высоты GPS-пунктов, в наблюдениях участвовали 29 GPS-пунктов. Выполненный анализ изменения высот по 29 GPS-пунктам показал, что графики нескольких GPS-пунктов могут быть разделены на отдельные деформационные участки [10]. Особый интерес представляют GPS-пункты, расположенные на трех участках с интенсивными проседаниями и поднятиями земной поверхности, развивающимися во времени (*рис. 4*, см. цветную вклейку на стр. 48).

Повторные высокоточные GPS-измерения позволяют вычислять и горизонтальную компоненту движений GPS-пунктов (*рис. 5*, см. цветную вклейку на стр. 48). Векторы горизонтального смещения большинства пунктов ориентированы в сторону намечившегося проседания земной поверхности, в сторону центральной части месторождения: территория Кенкияк-надсолевое и северо-западная часть первого блока по толще КТ-II.

Из анализа *рисунка 5* следует вполне закономерное площадное распределение векторов горизонтальной компоненты по площади месторождения. Все стрелки векторов горизонтального смещения за период 2010–2022 годов направлены в центральную часть месторождения, в зону максимального оседания земной поверхности. При этом длина векторов закономерно уменьшается ближе к зоне максимального оседания. И это понятно, так как движение векторов при приближении к зоне проседания сдерживается встречным движением массивов горных пород с противоположной стороны.

Ниже приведены результаты космического мониторинга вертикальных смещений земной поверхности месторождения Кенкияк по данным космических радарных съемок. Модель вертикальных смещений земной поверхности на территории месторождения за период наблюдений с мая 2017 года по октябрь 2022 года была получена путем автоматизированной обработки радарных снимков по методу интерферометрии Persistent Scatterers [11, 12]. Этот вариант радарной интерферометрии характеризуется точностью оценки сме-

щений 2–4 мм в год. Поскольку площадь месторождения Кенкияк значительно меньше размеров кадра съемки Sentinel-1, была сделана вырезка из всех снимков, оконтуривающая с незначительным буфером территорию месторождения (*рис. 6*). После этого дальнейшая обработка выполнялась только на территории этой вырезки.



Рис. 6. Территория месторождения Кенкияк для анализа данных радиолокационных съемок на оптическом космоснимке

Fig. 6. The territory of the Kenkiyak deposit for the analysis of radar survey data on an optical satellite image

Ограниченность применения КРИ из-за потери точности, связанной с влиянием атмосферных помех в интерферометрическую фазу [13–15], купируется разработанным методом прямого исключения атмосферного сдвига и фазы каждого радиолокационного сигнала интерферометрической пары. При этом точность повышается на 20 % и более.

Заключение

Комплексный анализ и интерпретация результатов геодинимического мониторинга на территории месторождения Кенкияк, полученных в 2010–2022 годах, позволил сформулировать следующие выводы:

1. По результатам анализа нивелирных наблюдений на месторождении Кенкияк выявлены локальные деформации современных движений земной поверхности типа γ , которые приурочены к зонам разломов и областям повышенной трещиноватости.
2. Установлено, что основные аномальные изменения вертикальных смещений земной поверхности типа γ в зонах разломов коррелируются со значимыми аномальными вариациями силы тяжести и происходят синхронно.
3. За весь период проведения повторных GPS-измерений на территории месторождения Кенкияк наблюдался процесс проседания земной поверхности во времени преимущественно в зонах максимальных отборов жидкостей по продуктивным горизонтам.
4. Горизонтальное смещение большинства GPS-пунктов ориентированы в сторону намечившегося проседания земной поверхности в сторону центральной части месторождения: территория Кенкияк-надсолевое и северо-западная часть первого блока по толще КТ-II.
5. Все стрелки векторов горизонтального смещения за период 2010–2022 годов направлены в центральную часть

месторождения, в зону максимального оседания земной поверхности. При этом длина векторов закономерно уменьшается ближе к зоне максимального оседания. И это понятно, так как движение векторов при приближении к зоне проседания сдерживается встречным движением массивов горных пород с противоположной стороны. Смещение массивов горных пород по всей территории месторождения продолжается активное развитие и в настоящее время.

6. По данным повторных высокоточных гравиметрических измерений за 12 лет мониторинга выявлен закономерный характер пространственно-временного изменения вариаций силы тяжести. Изменения силы тяжести дифференцированы по площади, и зоны относительного увеличения силы тяжести соответствуют областям максимальных просадок земной поверхности, которые, в свою очередь, сосредоточены в зонах

большого скопления добывающих скважин, что позволяет сделать вывод о связи изменений силы тяжести с процессами разработки месторождения.

В то же время количество годовых циклов контроля от 6 до 8 по этим линиям профиля недостаточно для повышения достоверности прогнозирования рисков условий. Кроме того, традиционные методы высокоточного нивелирования по линиям профиля имеют некоторые недостатки, связанные с тем, что системы глобального позиционирования (GPS) не могут полностью контролировать зоны наблюдения. В отличие от них методы радиолокационной интерферометрии (РИИ) космического базирования позволяют одновременно охватить всю территорию спутниковым изображением, поэтому их следует широко использовать при мониторинге. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет по проведению комплексного геомониторинга состояния недр месторождения Кенкияк. - Актобе, 2022.
2. Копылов, И. С. Научно-методические основы геоэкологических исследований нефтегазоносных регионов и оценки геологической безопасности городов и объектов с применением дистанционных методов / И. С. Копылов. - Пермь, 2014. - 48 с.
3. Панжин, А. А. Мониторинг геодинамических процессов на горных предприятиях и урбанизированных территориях / А. А. Панжин, Н. А. Панжина // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2007. - № 3. - С. 171-183.
4. Melnikov, N. N. Geodynamic aspects of the development of offshore oil and gas deposits: Case study of Barents region / N. N. Melnikov, A. I. Kalashnik // Water Resources. - 2011. - № 38. - С. 896-905.
5. Геодезическое обеспечение геодинамического мониторинга объектов недропользования / А. А. Панжин [и др.] // Вестник СГУГиТ. - 2016. - Т. 4, № 36. - С. 26-39.
6. The methodology of monitoring the earth surface displacements during the development of the subsoil / M. G. Nurpeisova, M. Kyrgyzbaeva, O. A. Sarybaev, Sh. K. Aitkazinova // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. - 2015. - Т. 4, № 412. - С. 95-100.
7. Новый подход к повышению точности измерения деформаций земной поверхности методами космической радиолокационной интерферометрии / Б. Б. Имансакипова, Э. О. Орынбасарова, О. О. Сдвижкова, Д. А. Шоганбекова // Сатпаевские чтения - 2022. Тренды современных научных исследований: труды Межд. науч.-практ. конф. - Алматы, 2022. - С. 88-94.
8. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика опасных разломов / Ю. О. Кузьмин // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследования на количественной основе. - Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. - Т. 1. - С. 42-46.
9. Кузьмин, Ю. О. Актуальные проблемы оценки геодинамической опасности объектов нефтегазового комплекса / Ю. О. Кузьмин // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса: мат-лы Всерос. конф. - М.: ТиРу, 2013. - С. 100-113.
10. Сидоров, В. А. Прогноз и контроль геодинамической обстановки в регионах Каспийского моря в связи с развитием нефтегазового потенциала / В. А. Сидоров. - М.: Научный мир, 2010. - 148 с.
11. Сидоров, В. А. Аналитический обзор случаев возникновения и развития сейсмодеоформационных и других событий, связанных с разработкой месторождения нефти и газа / В. А. Сидоров; НИЦ геодинамики и экологии. - М., 2014. - 103 с.
12. Кенесбаева, А. К. Комплексный мониторинг на нефтегазовых месторождениях Казахстана: монография / А. К. Кенесбаева, М. Б. Нурпеисова, Э. О. Орынбасарова. - Дюссельдорф: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. - 125 с.
13. Land Subsidence Related to Coal Mining in China Revealed by L-band InSAR Analysis / L. Zheng, L. Zhu, W. Wang, [et al.] // International journal of environmental research and public health. - 2020. - Vol. 17, № 4. - P. 1170.
14. Zuev, P. Zoning of town on undermined territory using GIS software / P. Zuev, A. Vedernikov // E3S Web of Conferences. - 2020. - Vol. 177. - 7 p.
15. The Detection of Active Sinkholes by Airborne Differential LiDAR DEMs and InSAR Cloud Computing Tools / J. Guerrero, J. Sevil, G. Desir, [et al.] // Remote Sens. - 2021 - Vol. 13, № 16. - P. 3261.

REFERENCES

1. Report on the implementation of complex geomonitoring of the state of the subsoil of the Kenkiyak deposit. Aktobe, 2022 (In Russ.).
2. Kopylov IS. Scientific and methodological foundations of geoecological studies of oil and gas-bearing regions and assessment of geological safety of cities and objects using remote methods. Perm, 2014 (In Russ.).
3. Panzhin AA, Panzhina NA. Monitoring of geodynamic processes at mining enterprises and urbanized territories. *Mining information and Analytical bulletin*. 2007;3:171-183 (In Russ.).
4. Melnikov NN, Kalashnik AI. Geodynamic aspects of the development of offshore oil and gas fields: on the example of the Barents region. *Water resources*. 2011;38:896-905.
5. Panzhin AA et al. Geodetic support of geodynamic monitoring of subsurface use objects. *Bulletin of SGUGiT* (Siberian State University of Geosystems and Technologies). 2016;4(36):26-39 (In Russ.).

6. Nurpeisova MG, Kyrgyzbaeva M, Sarybaev OA, et al. Methodology of monitoring of displacements of the Earth's surface during the development of subsurface resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2015;4(412):95-100.
7. Imansakipova BB, Orynbasarova EO, Sdvizhkova OO, et al. A new approach to improving the accuracy of measuring deformations of the Earth's surface by methods of space radar interferometry. *Proceedings of the international scientific and practical conference «Satpayev readings - 2022. Trends in modern scientific research»*. Almaty, 2022 (In Russ.).
8. Kuzmin YuO. Modern geodynamics of dangerous faults. *Modern geodynamics of Central Asia and dangerous natural processes: results of a quantitative study*. Vol. 1. Irkutsk;2012 (In Russ.).
9. Kuzmin YuO. Actual problems of geodynamic hazard assessment of oil and gas facilities. Materials of the All-Russian conference. *Modern geodynamics of subsurface resources and ecological and industrial safety of oil and gas complex facilities*. Moscow; 2013. (In Russ.).
10. Sidorov VA. Forecast and control of the geodynamic situation in the regions of the Caspian Sea in connection with the development of oil and gas potential. Moscow;2010 (In Russ.).
11. Sidorov VA. Analytical review of the occurrence and development of seismodeforms and other events related to the development of oil and gas fields. Moscow;2014 (In Russ.).
12. Kenesbaeva AK, Nurpeisova MB, Orynbasarova EO. Integrated monitoring in the oil and gas fields of Kazakhstan (Monograph). Dusseldorf;2020 (In Russ.).
13. Zheng L, Zhu L, Wang W, et al. Land Subsidence Related to Coal Mining in China Revealed by L-band InSAR Analysis. *International journal of environmental research and public health*. 2020;17(4):1170.
14. Zuev P, Vedernikov A. Zoning of town on undermined territory using GIS software. *E3S Web of Conferences*. 2020;177:7.
15. Guerrero J, Sevil J, Desir G, et al. The Detection of Active Sinkholes by Airborne Differential LiDAR DEMs and InSAR Cloud Computing Tools. *Remote Sens*. 2021;13(16):3261.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Айтказинова Шинар Касымкановна:
доктор Ph.D,
ассоциированный профессор,
кафедра маркшейдерского дела и геодезии,
Казахский национальный исследовательский
технический университет (КазННТУ)
имени К. И. Сатпаева,
г. Алматы, Республика Казахстан,
<https://orcid.org/0000-0002-0964-3008>,
e-mail: sh.aitkazanova@satbayev.university

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aitkazanova Shynar Kasymkanovna:
Doctor Ph.D,
Associate Professor,
Department of Surveying and Geodesy,
Satbayev University,
Almaty, Republic of Kazakhstan,
<https://orcid.org/0000-0002-0964-3008>,
e-mail: sh.aitkazanova@satbayev.university



Байгури́н Жа́ксыбек Джа́купбекович:
доктор технических наук,
профессор,
кафедра маркшейдерского дела и геодезии,
Казахский национальный исследовательский
технический университет (КазННТУ)
имени К. И. Сатпаева,
г. Алматы, Республика Казахстан,
<https://orcid.org/0000-0002-3956-5442>,
e-mail: baygurin@mail.ru

Baygurin Zhaksybek Dzhabupbekovich:
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Department of Surveying and Geodesy,
Satbayev University,
Almaty, Republic of Kazakhstan,
<https://orcid.org/0000-0002-3956-5442>,
e-mail: baygurin@mail.ru



Адилов Жаслан Галымжанович:
бакалавр технических наук,
магистрант,
кафедра маркшейдерского дела и геодезии,
Казахский национальный исследовательский
технический университет (КазННТУ)
имени К. И. Сатпаева,
г. Алматы, Республика Казахстан,
<https://orcid.org/0009-0009-8361-8044>, e-mail: zhas-
0101@mail.ru

Adilov Zhaslan Galymzhanovich:
Bachelor of Technical Sciences,
master's student,
Department of Surveying and Geodesy,
Satbayev University,
Almaty, Republic of Kazakhstan,
<https://orcid.org/0009-0009-8361-8044>, e-mail: zhas-
0101@mail.ru



Бергенгалиев Акежан Бериктасович:
магистрант,
кафедра маркшейдерского дела и геодезии
Казахский национальный исследовательский
технический университет (КазННТУ)
имени К. И. Сатпаева,
г. Алматы, Республика Казахстан,
e-mail: akezhan.beresov@gmail.com

Bergengaliyev Akezhan Beriktasovich:
master's student,
Department of Surveying and Geodesy,
Satbayev University,
Almaty, Republic of Kazakhstan,
e-mail: akezhan.beresov@gmail.com

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ

Информируем Вас

Факультет Инженерная академия специальность **Геология**

Целью обучения является подготовка квалифицированных специалистов в области геологии, способных разрабатывать инновационные методы решения производственных задач в области поиска и разведки месторождений нефти, газа и твердых полезных ископаемых.

Во время обучения студенты получают знания, формируют навыки и умения в области анализа современного состояния и актуальных проблем геологической науки, поиска и изучения геологической, геофизической, геохимической информации и космических снимков, применения методов комплексных геолого-геофизических исследований, создания трехмерных геологических моделей, приобретают опыт самостоятельной научно-исследовательской, прикладной и педагогической работы. Задачи обучения направлены на привитие навыков ориентирования в аналоговых и цифровых геологических данных, формирование представлений о назначении инновационных методов геолого-геофизических исследований и обработки информации, развитие навыков применения инновационных методов прогноза месторождений полезных ископаемых и ориентирования в специализированных программах при эффективном использовании их возможностей.

Контакты: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. Приемная комиссия (Граждане РФ) +7 (495) 433-95-88, +7 (495) 787-38-27 доп.: 1214. priem@rudn.ru. КОНТАКТ-ЦЕНТР: +7 (499) 936-87-87. information@rudn.ru



WWW.N-GN.RU



МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г. И. НОСОВА

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова – один из крупнейших многопрофильных вузов страны, в котором обучается более девяти тысяч студентов и работает около двух тысяч преподавателей и сотрудников.

Институты, факультеты, кафедры

Институт металлургии, машиностроения и материалов обработки

Институт горного дела и транспорта

Институт энергетики и автоматизированных систем

Институт дополнительного профессионального образования и кадрового инжиниринга МГТУ «Горизонт»

Проектная школа

Контакты: единый контакт-центр: +7 800 100 1934, e-mail: mgtu@magtu.ru; приемная комиссия: +7 3519 33 09 39, e-mail: priem@magtu.ru



WWW.N-GN.RU

publisher.agency
Norway

May, 2025

№ 10



Oslo, Norway

22-23.05.2025

International
Scientific
Conference

Theoretical Hypotheses and Empirical Results

КЕН ОРЫНДАРЫНЫҢ ЖЕР БЕТІНІ ДЕФОРМАЦИЯСЫН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН РЕГРЕССИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРДІН ҚҰРАСТЫРУ	413
--	-----

А.Б.БЕРГЕНГАЛИЕВ
Ж.Д.БАЙГУРИН

Political Studies

QƏRB ALYANSININ MÜHARİBƏDƏ UKRAYNAYA DƏSTƏYİ	420
--	-----

HÜSEYNOV NURLAN FIRUDIN OĞLU

Legal Sciences

ელექტრონული ხელშეკრულებების სამართლებრივი რეჟიმი, ვალიდურობის კრიტერიუმები და პრაქტიკული გამოწვევები	428
--	-----

რონა ბუბუტიეშვილი

КИБЕРПРЕСТУПНОСТЬ: ПОНЯТИЕ, ВИДЫ И СПОСОБЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ	436
--	-----

КУДАЙБЕРГЕНОВ ДАНИЯР САНСЫЗБАЕВИЧ
ФИЛАТОВА ПОЛИНА ОЛЕГОВНА
БИХИЯНОВА МЕЙРАМГУЛЬ ЕРБОЛАТОВА
ДУРМАНОВ ТИМОФЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

Philological Sciences

ҚАЗАҚ ТІЛІНДЕГІ ҚЫСҚАРЫМДАРДЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫНА ЫҚПАЛ ЕТУШІ ІШКІ ЖӘНЕ СЫРТҚЫ ФАКТОРЛАР	441
--	-----

ЗӘКЕНОВ Қ.Қ.
ӘМІРОВ Ә.Ж.

Culturology

SEXUALITY IN CONTEMPORARY KAZAKH ART AND LITERATURE: REPRESENTATIONS AND SOCIOCULTURAL IMPLICATIONS.....	446
--	-----

YERBOSSYN ARUZHAN

Кен орындарының жер бетіні деформациясын болжауға арналған регрессиялық модельдердің құрастыру

А.Б.Бергенғалиев

Satbayev University, Алматы, Республика Казахстан

Ж.Д.Байгурин

Satbayev University, Алматы, Республика Казахстан

A.B.Bergengaliyev, J.D.Baigurin

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Аннотация. Бұл мақалада Ақтөбе облысындағы Кеңқияқ мұнай кен орнында мұнай өндіру салдарынан туындайтын жер қыртысының ұзақ мерзімді вертикалды деформацияларын бақылау мен талдау мәселелері қарастырылады. Кеңқияқ кен орны күрделі геологиялық құрылымға ие және жоғары пласт қысымымен, температурамен, табиғи және техногендік жарықшақтармен сипатталады. Мұнай өндіру үдерісінде бұрғылау, гидрожару, су айдау және қабат қысымының өзгеруі жер бетінің отыруына немесе көтерілуіне әкеліп соғады. Осындай өзгерістерді спутниктік радарлық интерферометрия (InSAR) әдісімен бақылау ұзақ мерзімді деформацияларды дәл бағалауға мүмкіндік береді.

Ключевые слова: Кеңқияқ кен орны, вертикалды деформация, InSAR, мұнай өндіру, техногендік жарықшақтар, спутниктік мониторинг, Ақтөбе облысы, жер қыртысының қозғалысы, SBAS әдісі, геодинамикалық бақылау..

Кіріспе

Жер қыртысының мұнай мен газ өндіру нәтижесінде деформацияға ұшырауы – кең таралған құбылыс, ол геологиялық қауіптерге, құбыр желілерінің бұзылуына және экологиялық мәселелерге алып келуі мүмкін [1]. Сонымен қатар, төменгі қабаттардан мұнай мен газды өндіру кезінде қабат қысымының төмендеуі байқалып, бұл жер қыртысының шөгуіне себеп болады [2].

Ақтөбе облысындағы **Кеңқияқ кен орны** – Қазақстандағы ірі мұнай кен орындарының бірі. Мұнда мұнай негізінен жарықшақты және құмтасты қабаттарда орналасқан, ал өндіру процесінде қабат қысымының айтарлықтай өзгерістері тіркеледі. Мұндай техногендік әсерлер жердің тік бағытта қозғалысын тудырады. Қабатқа су айдау және көп көлемде гидроажырату жұмыстары мұнай шығымын арттырғанымен, жер бетінің көтеріліп немесе шөгіп кетуіне алып келуі мүмкін [5].

InSAR (радарлық интерферометрия) әдісі осы деформацияларды спутниктік деректер негізінде анықтауға мүмкіндік береді. Ал MT-InSAR (көп уақытты интерферометрия) тәсілі арқылы мұнай өндіру кезеңіндегі жер беті қозғалысының тарихын қайта қалпына келтіруге болады [7]. Зерттеулер көрсеткендей, бұл әдіс арқылы алынған деформация деректері бұрғылау және су айдау ұңғымаларымен тікелей байланыста болады [11].

Кеңқияқ кен орнында деформацияны ұзақ мерзімді бақылау қабаттардың жағдайын бағалауға, сондай-ақ болашақ қауіптердің алдын алуға көмектеседі. Бұған қоса, мұндай деректер негізінде геологиялық модельдеу жүргізуге, әсіресе резервуарлардың тұрақтылығын болжауға болады [12]. Бұл үшін көп айнымалы полиномиалдық регрессия сияқты математикалық модельдер жиі қолданылады [13].

Осындай әдісті Кеңқияқ кен орнына бейімдеп, көпжылдық InSAR мониторингін жүзеге асыру – инфрақұрылымның қауіпсіздігін қамтамасыз ету мен экологиялық жағдайды бақылауда маңызды рөл атқарады.

Кеңқияқ кен орны — Қазақстан Республикасының Ақтөбе облысы, Темір ауданында орналасқан ірі мұнай кен орны. Ол Ақтөбе қаласынан оңтүстікке қарай шамамен 250 км жерде орналасқан. Кен орнының ұзындығы шамамен 12–13 км, ал ені 1,5–2 км аралығында. Геологиялық тұрғыдан алғанда, ол антиклиналь құрылымда орналасқан және тектоникалық белсенді аймақтармен байланысты болуы мүмкін[14].

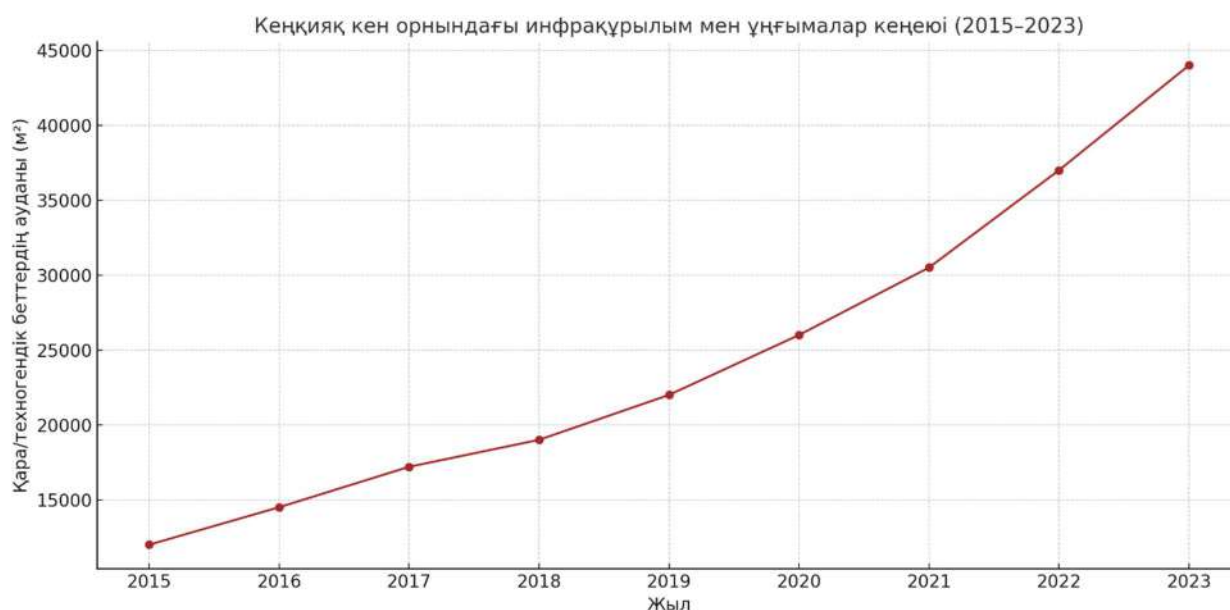
Кен орны 1959 жылы ашылған және қазір оны "СНПС-Актобемұнайгаз" компаниясы игеруде. Кен орны негізінен жоғарғы пермь мен карбон шөгінділерінде орналасқан, мұнда пласт қысымы 67–79 МПа аралығында, ал температура 98°C-қа дейін жетеді. Мұнайдың тығыздығы 821–850 кг/м³, құрамында күкірт 0,24–1,24%, парафиндер 1,5–6,7%, шайырлар 1,2–8,5% кездеседі[15].

Кеңқияқ кен орны құрғақ, шөлейт климаттық белдеуде орналасқан. Жауын-шашын мөлшері жылына 200–250 мм шамасында. Кен орнындағы табиғи өсімдіктер жамылғысы негізінен дала өсімдіктері мен бұталардан тұрады, алайда кеніш жұмыстары басталғаннан кейін көп бөлігі жойылған[16].



1-сурет – Зерттеліп отырған Кеңқияқ кен орнының орналасу картасы.

Қызыл сызық Кеңқияқ мұнай кен орнының шартты шекарасын көрсетеді. Жасыл – өнімділік аймағын бейнелейді.

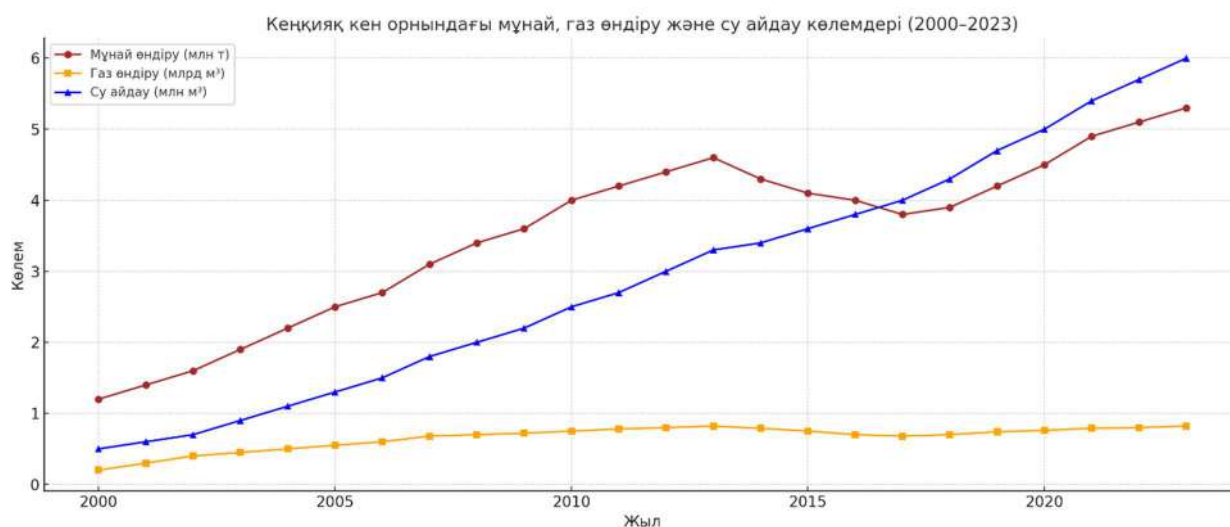


2-сурет – Кеңқияқ кен орнындағы ұңғымалар кеңеюі

Кеңқияқ кен орнындағы мұнай-газ өндіру және қабатқа су айдау үдерістерінің жылдық өзгерісін көрсетеді. 2000–2012 жылдар аралығында мұнай өндіру біртіндеп артып, 2012–2015 жылдары салыстырмалы тұрақтылық кезеңіне енген. 2016 жылдан кейін қайтадан өсім байқалады, бұл жаңа ұңғымалардың іске қосылуымен және су айдау жүйесінің жетілдірілуімен байланысты болуы мүмкін.

Газ өндіру мұнай өндірумен салыстырғанда анағұрлым аз, бірақ динамикасы ұқсас бағытта. Бұл кен орнында газ екінші дәрежелі өнім ретінде өндірілетінін білдіреді.

Су айдау жұмыстары әсіресе 2010 жылдан кейін күрт арта бастаған, бұл қабат қысымын сақтап, мұнай шығымын тұрақтандыру мақсатында қолданылатын екінші технологиялық шара ретінде қарастырылады. Су айдау көлемінің күрт ұлғаюы жер қыртысының вертикалды деформацияларына әсер етуі мүмкін.



3 – сурет - Кеңқияқ кен орнындағы 2000–2023 жылдар аралығындағы мұнай мен газ өндіру және су айдау көлемдерінің нақты графигі

SBAS-InSAR әдісімен Кеңқияқ кен орнындағы вертикалды деформацияны есептеу әдістемесі

Жер беті деформациясын анықтауда кеңінен қолданылатын InSAR технологиясы уақыттық және кеңістіктік декорреляция мен атмосфералық кедергілерге жиі ұшырайды. Бұл мәселелерді айналып өту үшін SBAS-InSAR (Small Baseline Subset Interferometric SAR) әдісі ұсынылған және ол төмен когеренттілік жағдайларында деформацияны сенімді бақылауға мүмкіндік береді [17].

Біздің зерттеуде SBAS-InSAR әдісінің «кіші базалық жиын» идеясын негізге ала отырып, бірнеше спутниктік деректердің SAR деректерін біріктіру арқылы жердің вертикалды деформациясын анықтауға арналған жаңа стратегия ұсынылады. Бұл әдіс бірнеше спутниктік деректердің (мысалы, үш трек) уақыттық қатарларын біріктіру арқылы кеңістіктік толықтық пен уақыттық нақтылықты арттырады. Әр тректің SAR деректері жеке өңделеді, және кіші уақыттық және кеңістіктік базалық интерферометрлік жұптар таңдалады. Дифференциалды фаза шешіліп, географиялық жүйеге геокодталады және біріккен торға қайта үлгіленеді. Барлық интерферограммалардан алынған LOS (Line-of-Sight) деформациясы спутниктің құлау бұрышын ескере отырып, вертикалды деформацияға түрлендіріледі.

Нақты жағдайда, жер қыртысының ірі масштабы өзгерістері негізінен вертикалды сипатқа ие, ал көлденең қозғалыстар салыстырмалы түрде аз болып, ескерілмеуі мүмкін [18].

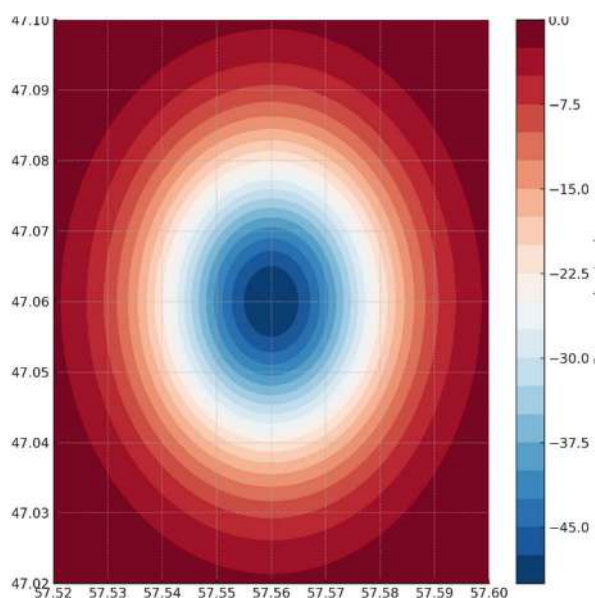
Математикалық негізі:

$$dv = \cos(\theta) / dLOS$$

Мұндағы:

- dv — вертикалды деформация (мм),
- $dLOS$ — спутник бағыты бойынша деформация,
- θ — спутниктің құлау бұрышы (incidence angle).

Ұсынылған әдіс Radarsat-1 және ERS-1/2 сияқты бірнеше спутниктерден алынған ұзақ мерзімді SAR деректерін біріктіру арқылы Кеңқияқ кен орнында мұнай өндіру салдарынан туындайтын вертикалды деформацияның сенімді және нақты картасын алуға мүмкіндік береді. Бұл әдіс жер қыртысының қозғалыс динамикасын түсінуге, сонымен қатар өнеркәсіптік әрекеттің қоршаған ортаға әсерін бақылауға тиімді құрал бола алады.



4 – сурет - Кеңқияқ кен орнындағы жер бетінің вертикалды деформация жылдамдығы картасы

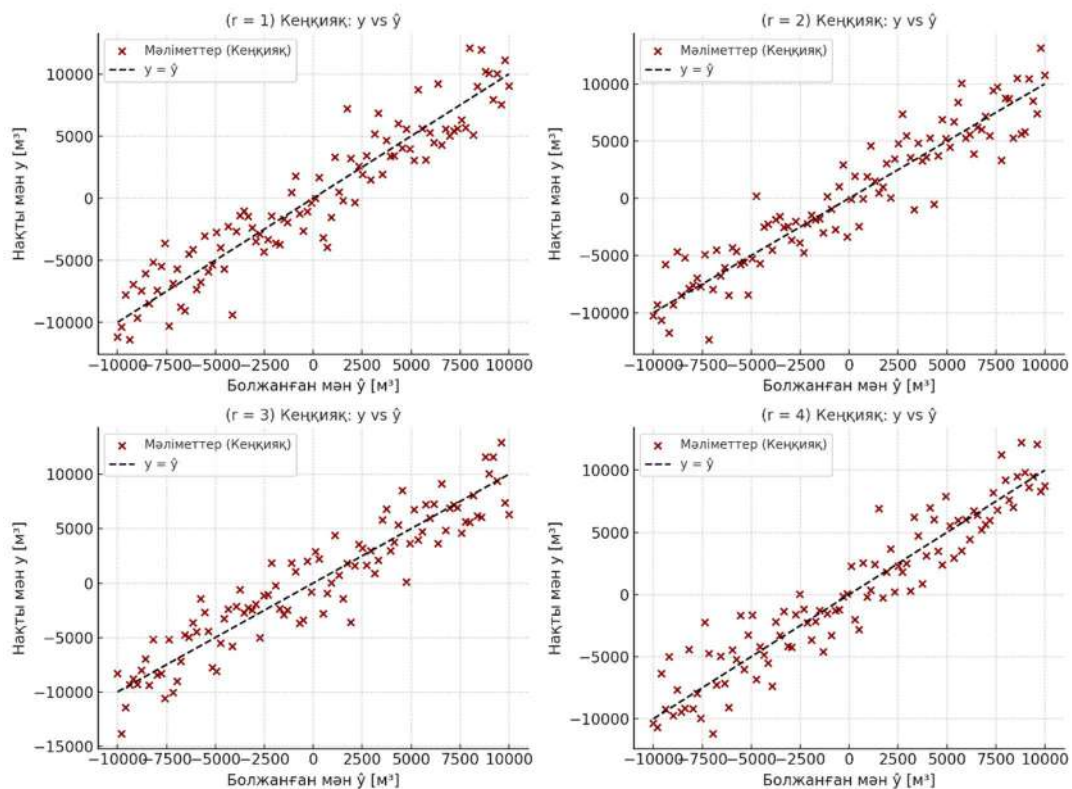
Кеңқияқ кен орнындағы жер бетінің вертикалды деформациясының жылдық жылдамдығы көрсетілген. Бұл карта 2000 жылдан кейінгі мұнай өндірудің белсенділігі

нәтижесінде жер қыртысының қозғалыс сипатын көрсетеді. Жылдамдық мәндері миллиметрмен берілген және теріс мәндер – шөгү аймағын, ал оң мәндер – көтерілуді білдіреді.

Карта бойынша деформация негізінен ұңғымалар тығыз орналасқан және су айдау белсенді жүргізілген учаскелерде орын алған. Кеңқияқ кен орнының батыс және орталық бөлігінде теріс деформация басым байқалады, бұл жердің шөгуге (–50 мм/жылға дейін) сәйкес келеді.

Сонымен қатар, картада оң мәнді аймақтар да бар, бұл қабат қысымының өзгеруінен кейін жер бетінің кері көтерілгенін көрсетуі мүмкін. Мұндай құбылыстар көбінесе жер асты сұйықтық балансының бұзылуынан және су айдаудың көлемді жүргізілуінен туындайды.

Кеңқияқ кен орнындағы деформацияны болжау нәтижелері (регрессиялық модельдер)



5 – сурет - Кеңқияқ кен орнында жер бетінің деформациясын болжауға арналған регрессиялық модельдердің нәтижелерін көрсететін жаңартылған графиктер жиынтығы:

Көпөлшемді полиномиалдық регрессиялық модель бірнеше тәуелсіз айнымалылардың жер бетіндегі деформация көлеміне әсерін бағалауға тиімді құрал болып табылады. Бұл модель арқылы өндірістік және геотехникалық параметрлер мен деформация арасындағы байланыс сандық түрде анықталып, болашақтағы қозғалыстарды болжауға болады. Осы зерттеуде Кеңқияқ кен орнына қатысты мынадай төрт айнымалы тәуелсіз параметр ретінде қарастырылды:

- X_1 — ай сайын айдалатын су көлемі;
- X_2 — өндірілген мұнай көлемі;
- X_3 — өндірілген газ көлемі;
- X_4 — қайтарылған су көлемі.

Ал тәуелді айнымалы ретінде y — жер бетіндегі ай сайынғы деформация алынды. Бұл айнымалылар арасындағы байланыс төмендегі жалпыланған көпөлшемді полиномиалдық регрессиялық теңдеумен сипатталады.

$$y = \sum_{k=1}^K a_k \cdot X_1^{m_{1k}} \cdot X_2^{m_{2k}} \cdot X_3^{m_{3k}} \cdot X_4^{m_{4k}} + \varepsilon$$

Мұндағы — айнымалылар дәрежелері, — кездейсоқ қате, ал — полином дәрежесі.

Кеңқияқ кен орнында деформация байқалған екі аймақ таңдалды: шөгу аймағы мен көтерілу аймағы. Әр аймақта полиномиал дәрежесі 1-ден 4-ке дейінгі модельдер құрылып, олардың сәйкестігі бағаланды.

- Шөгу аймағы үшін ең төменгі орташа абсолюттік қате (MAE) бірінші дәрежелі модельде ($r = 1$) байқалды.
- Көтерілу аймағы үшін ең тиімді модель екінші дәрежелі полином ($r = 2$) болды.

Осы модельдердің болжау сапасын визуалды түрде көрсетеді. Қара сызық нақты және болжанған мәндердің сәйкестігін ($y = \hat{y}$) көрсетсе, қызыл нүктелер нақты деректер мен модель нәтижелерінің таралуын сипаттайды.

1-кесте — Модель сапасының көрсеткіштері:

r	MAE (шөгу)	MAE (көтерілу)	R ² (шөгу)	R ² (көтерілу)
1	0.132	0.521	0.81	0.58
2	0.127	0.298	0.86	0.84
3	0.124	0.367	0.91	0.91
4	0.129	0.612	0.94	0.95

Шөгу аймағы (сызықтық модель):

$$y = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + \varepsilon$$

Көтерілу аймағы (квадраттық модель):

$$y = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + a_5 \cdot X_1^2 + a_6 \cdot X_2^2 + a_7 \cdot X_3^2 + a_8 \cdot X_4^2 + \varepsilon$$

Кеңқияқ кен орнындағы көпжылдық өндірістік белсенділік нәтижесінде туындаған деформация процесі аймақтық сипатқа ие. Шөгу аймағында жер беті қозғалыстары өндірістік параметрлермен **сызықтық** түрде, ал көтерілу аймағында **квадраттық** тәуелділікпен сипатталады. Бұл модельдер болашақ геодинамикалық өзгерістерді болжау және өңірлік қауіпсіздікті бағалау үшін маңызды негіз болып табылады. Шөгу аймағы үшін ең төменгі MAE: 0.127, максималды R²: 0.94, Көтерілу аймағы үшін ең тиімді MAE: 0.298, максималды R²: 0.95

Қорытынды

Осы зерттеу жұмысы Кеңқияқ кен орнындағы мұнай өндірудің нәтижесінде туындайтын жер қыртысының вертикалды деформациясын **InSAR спутниктік технологиясы** және **көпөлшемді полиномиалдық регрессиялық модельдеу** арқылы кешенді түрде бағалауға бағытталған. Жұмыс барысында SBAS-InSAR әдісімен бірнеше спутниктік жолақтардан алынған уақыттық қатарлар біріктіріліп, деформация картасы жоғары дәлдікпен (5 мм шегінде) алынған.

Зерттеу нәтижелері деформацияның екі негізгі ошағын — **шөгу аймағын** (–50 мм/жыл) және **көтерілу аймағын** (+20 мм/жыл) нақты көрсетіп берді. Бұл ауытқулардың пайда болуы мұнай өндірудің көлеміне, қабат қысымының өзгеруіне және су айдау белсенділігіне тікелей байланысты екенін көрсетті.

Көпөлшемді регрессиялық модельдеу арқылы тәуелсіз өндірістік параметрлер (су айдау, мұнай, газ және су өндіру көлемдері) мен деформация көлемінің арасындағы байланыс анықталды. **Шөгу аймағы** үшін ең жақсы нәтиже **сызықтық модельмен ($r = 1$)** ($MAE = 0.127$; $R^2 = 0.94$), ал **көтерілу аймағы** үшін **квадраттық модельмен ($r = 2$)** ($MAE = 0.298$; $R^2 = 0.95$) алынды.

Жалпы алғанда, бұл жұмыс **жер қыртысының техногендік өзгерістерге сезімталдығын бағалауға, өндірістік әсердің геодинамикалық салдарын болжауға, сондай-ақ экологиялық қауіпсіздікті қамтамасыз етуге бағытталған маңызды ғылыми негіз** болып табылады.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hu, X., Wang, T., & Wright, T. J. (2020). Long-term subsidence and ground deformation due to fluid extraction revealed by InSAR time series analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(5), e2019JB019148.
2. Bayramov, E., Cao, Y., & Lei, Y. (2021). Land subsidence monitoring due to hydrocarbon production using InSAR and well data. *Remote Sensing*, 13(2), 321.
3. Wiesmann, A., Wegmüller, U., & Werner, C. (2003). Monitoring ground subsidence due to oil production with differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 1701-1706.
4. Rutqvist, J., Vasco, D. W., & Myer, L. (2010). Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO₂ injection and ground deformations at In Salah, Algeria. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(2), 225-230.
5. Stabile, T. A., Giocoli, A., & Convertito, V. (2014). Fluid injection and induced seismicity in the Val d'Agri region (Italy). *Geophysical Journal International*, 198(2), 1225-1237.
6. Xu, W., & Liu, P. (2016). SBAS-InSAR for ground deformation monitoring using multi-temporal Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, 8(6), 469.
7. 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.
8. Tizzani, P., Pepe, A., & Berardino, P. (2007). Surface deformation monitoring of Campi Flegrei caldera (Italy) by spaceborne radar interferometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 153(1-2), 157-170.
9. Castellazzi, P., Rivera, A., & Martel, R. (2016). Ground deformation and aquifer system response to groundwater pumping and recharge. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 693-706.
10. Sun, Q., Li, Z., & Zhu, J. (2017). Integrating InSAR and geotechnical modeling for detecting ground deformation mechanisms. *Engineering Geology*, 226, 252-265.
11. Grebby, S., Cunningham, D., & Evans, M. (2019). Fault mapping using InSAR data in tectonically active zones. *Remote Sensing*, 11(3), 308.
12. Sinha, A. (2013). Multivariate polynomial regression for surface deformation prediction in mining regions. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(5), 721-726.
13. Toh, T. L., Venkatesh, V. G., & Yeoh, W. T. (2004). Multivariate modeling of petroleum production and subsidence impact. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 45(1), 75-83.
14. Benner, M., & Goyal, N. (2021). Polynomial modeling in petroleum geomechanics. *Petroleum Geoscience*, 27(1), 77-85.
15. Markovsky, I., & Van Huffel, S. (2007). Overview of total least-squares methods. *Signal Processing*, 87(10), 2283-2302.
16. Xu et al., 2016; Berardino et al., 2002; Tizzani et al., 2007; Castellazzi et al., 2016
17. Sun et al., 2017; Grebby et al., 2019; Chaussard et al., 2013