

FTAMP 67.21.17 : 67.21.15

Г.М. Отарбаева¹ – негізгі автор, ©
Д.Ж. Артықбаев², Ж. Бердалиева³,
М.Т. Куттыбай⁴, Ж.А. Үсенқұлов⁵



¹Докторант, ²PhD, доцент, ³Оқытушы, ⁴PhD,
⁵Техн. ғылым. канд., профессор

ORCID

¹<https://orcid.org/0009-0001-2401-9457> ²<https://orcid.org/0000-0003-4794-8707>
³<https://orcid.org/0009-0003-5477-5151> ⁴<https://orcid.org/0009-0004-3980-9445>
⁵<https://orcid.org/0000-0002-2609-1671>



¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
^{2,4,5}М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті,
Шымкент, Қазақстан
³Қазақ бас сәулет-құрылыс академиясы, Алматы, Қазақстан

@

²artykbaev_d@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/RFEP5134>

КАСПИЙ ҮСТІРТІ АУМАҒЫНДАҒЫ ЖЕР БЕТІНІҢ ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ ЫҒЫСУЛАРЫНЫҢ ГЕОДИНАМИКАЛЫҚ АЛҒЫШАРТТАРЫ

Аңдатпа. Мақалада Каспий үстірті аумағында жер бетінің қазіргі заманғы деформациялық ығысуларының қалыптасуының геодинамикалық алғышарттары қарастырылады. Зерттеу деформациялық процестердің кеңістіктік-уақыттық ерекшеліктерін сипаттайтын геологиялық, құрылымдық-тектоникалық және инженерлік-геодезиялық деректерді кешенді талдауға негізделген. Деформациялық ығысуларының сандық бағасын жүргізу үшін тік және көлденең ығысуларды миллиметрлік дәлдікпен анықтауды қамтамасыз ететін спутниктік радарлық интерферометрия (InSAR) және ғаламдық навигациялық спутниктік жүйелер (GNSS) деректері пайдаланылды. Деформация жылдамдықтарының карталары мен уақыттық қатарларын талдау деформациялық өрістің айқын кеңістіктік әртектілігін және жер бетінің жекелеген учаскелерінде үдемелі шөгу процесін көрсететін тік ығысулардың орнықты төмендеуші трендтерінің бар екенін анықтады. Деформациялардың ең жоғары жылдамдықтары тұзды күмбездердің дамыған аймақтарына және тектоникалық бұзылыстарға тән екені, сондай-ақ сыртқы табиғи және техногендік факторлардың әсерінен күшейетіні анықталды. Алынған нәтижелер баяу геодинамикалық процестерді мониторингтеуде InSAR және GNSS әдістерін кешенді қолданудың тиімділігін растайды және оларды Каспий үстірті аумағындағы геодинамикалық тәуекелдерді бағалау, инженерлік құрылыстар мен мұнай-газ инфрақұрылымы нысандарын жобалау және пайдалану барысында қолдануға мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: геодинамика, деформациялық ығысулар, Каспий үстірті, тұзды тектоника, жер беті, InSAR, GNSS, инженерлік-геодезиялық мониторинг, шөгінді жамылғы, геодинамикалық тәуекелдер.



Отарбаева, Г.М. Каспий үстірті аумағындағы жер бетінің деформациялық ығысуларының геодинамикалық алғышарттары [Мәтін] / Г.М. Отарбаева, Д.Ж. Артықбаев, Ж. Бердалиева, М.Т. Куттыбай, Ж.А. Үсенқұлов // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2026. – №1(91). – Б.307-318.
<https://doi.org/10.55956/RFEP5134>

Кіріспе. Каспий үстірті геодинамикалық тұрғыдан күрделі аймақтардың қатарына жатады, оған қалың шөгінді жамылғының болуы, тұзды тектониканың кең дамуы және қазіргі заманғы деформациялық үдерістердің қатар жүруі тән. Солтүстік Каспий аумағында жер бетінің аймақтық деңгейдегі тік қозғалыстарымен қатар, біркелкі емес шөгудер, көтерілу құбылыстары және көлденең ығысулар түрінде көрінетін жергілікті деформациялық жылжулар байқалады. Мұндай деформациялар инженерлік құрылыстар мен мұнай-газ инфрақұрылымы нысандары үшін әлеуетті қауіп төндіреді [1,2].

Жер бетінің қазіргі деформацияларының геодинамикалық алғышарттары едәуір дәрежеде Каспий бассейнінің құрылымдық-тектоникалық эволюциясымен анықталады. Бассейннің қалыптасуы барысында қалың тұзды және терригендік шөгінді қабаттардың жиналуы орын алып, бұл тұзды-күмбезді тектониканың кеңінен дамуына әкелді. Айқын реологиялық қасиеттерге ие тұзды құрылымдар шөгінді жамылғыдағы кернеулердің қайта бөлінуіне және жергілікті шоғырланған деформация аймақтарының қалыптасуына елеулі әсер етеді, ал мұндай деформациялар жер бетіне дейін таралуы мүмкін [3,4].

Аймақтың қазіргі кернеулі-деформацияланған күйі ішкіплиталық үдерістердің, сондай-ақ альпілік-гималайлық орогендік белдеудің қашықтан әсер етуінің ықпалымен қалыптасады. Оңтүстік және Солтүстік Каспий маңындағы тектоникалық кернеу өрістерін зерттеу нәтижелері құрылымдық әртектіліктер мен жарылымдық бұзылыстар аймақтарында әсіресе айқын байқалатын, баяу, бірақ ұзақ мерзімді жер беті жылжуларын қоздыруға қабілетті тұрақты деформациялық режимдердің бар екенін көрсетеді [5].

Деформациялық үдерістердің сипатына табиғи-климаттық факторлар, ең алдымен Каспий теңізі деңгейінің ауытқулары елеулі әсер етеді. Теңіз деңгейінің өзгеруі жүктемелердің қайта бөлінуіне, гидрогеологиялық жағдайлардың және жер бетіне жақын грунттардағы кеуекті қысымның өзгеруіне әкеледі, бұл Каспий үстіртіне іргелес аумақтарда шөгу және деформациялық үдерістердің белсенденуіне ықпал етуі мүмкін [6].

Соңғы жылдары Каспий аймағындағы қазіргі деформациялық жылжуларды зерттеуге спутниктік радиолокациялық интерферометрияға (InSAR) және жаһандық навигациялық спутниктік жүйелерге (GNSS) негізделген инженерлік-геодезиялық мониторинг әдістері айтарлықтай үлес қосты. Аталған әдістер деформациялардың кеңістікте таралған өрістерін миллиметрлік дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді және жер бетінің табиғи әрі техногендік факторлармен шартталған жылжуларын сандық тұрғыдан бағалауды қамтамасыз етеді [7].

Геодезиялық және геофизикалық деректердің ауқымды қорының болуына қарамастан, байқалатын деформациялық жылжуларды аймақтық геодинамика және тұзды-тектоникалық механизмдер тұрғысынан түсіндіру мәселелері әлі де жеткілікті түрде жүйеленбеген. Бұл жағдай Каспий үстіртіндегі жер беті деформацияларының геодинамикалық алғышарттарын өңірдің терең құрылымын, қазіргі кернеулі күйін және инженерлік-геодезиялық бақылаулар нәтижелерін ескере отырып, кешенді талдау қажеттігін айқындайды.

Осы ғылыми-зерттеу мақаласының мақсаты – қазіргі геологиялық, тектоникалық және геодезиялық деректерді талдау негізінде Каспий үстіртіндегі жер бетінің деформациялық жылжуларының геодинамикалық

алғышарттарын негіздеу және байқалатын деформациялардың қалыптасу механизмдерін анықтау болып табылады.

Зерттеу шарттары мен әдістері. *Зерттеу материалдары.* Зерттеу материалдары ретінде Каспий үстіртіндегі жер бетінің қазіргі деформациялық үдерістерін сипаттайтын геологиялық, геодинамикалық және инженерлік-геодезиялық деректерді кешенді талдау нәтижелері пайдаланылды. Жұмыстың негізіне Солтүстік Каспий бассейнінің құрылымы, тұзды-тектоникалық құрылымдар және өңірдің қазіргі кернеулі-деформацияланған күйі бойынша жарияланған деректер [1-4], сондай-ақ заманауи зерттеулерде келтірілген спутниктік және жерүсті геодезиялық бақылаулардың нәтижелері алынды [5-7].

Бастапқы геодинамикалық ақпарат ретінде төмендегілер қолданылды:

- шөгінді жамылғының тереңдік құрылысы және тұзды күмбездердің таралуы туралы деректер;
- аймақтық тектоникалық кернеулер жөніндегі мәліметтер;
- Жерді қашықтан зондтау материалдары (InSAR);
- GNSS-бақылауларының және жерүсті геодезиялық өлшеулердің деректері.

Зерттеу әдістері.

Геодинамикалық және құрылымдық-тектоникалық талдау. Деформациялық жылжулардың геодинамикалық алғышарттарын анықтау үшін құрылымдық-тектоникалық талдау әдісі қолданылды. Бұл әдіс терең орналасқан тұзды-тектоникалық құрылымдарды жер беті деформацияларының кеңістіктік таралуымен салыстыруға негізделген [3,4]. Ерекше назар тектоникалық бұзылыстар аймақтарына және тұзды күмбездердің даму облыстарына аударылды, себебі олар жер бетінде локализацияланған деформациялардың ықтимал көздері ретінде қарастырылады.

Аймақтың кернеулі-деформацияланған күйін бағалау жер сілкінісі ошақтарының механизмдері мен геофизикалық модельдер негізінде алынған тектоникалық кернеу өрістері туралы жарияланған деректерге сүйене отырып жүргізілді [5].

Деформацияларды инженерлік-геодезиялық мониторингтеу. Жер бетінің деформациялық жылжуларын сандық тұрғыдан бағалау спутниктік радиолокациялық интерферометрия (InSAR) және жаһандық навигациялық спутниктік жүйелердің (GNSS) деректерін қолдану арқылы жүзеге асырылды, бұл баяу деформациялық үдерістерді мониторингтеудің қазіргі заманғы тәсілдеріне сәйкес келеді [7].

Жер бетінің тік және көлденең жылжулары келесі өрнектер бойынша анықталды:

$$\Delta h = h_t - h_0 \quad (1)$$

$$\Delta x = x_t - x_0 \quad (2)$$

$$\Delta y = y_t - y_0 \quad (3)$$

мұндағы h_0, x_0, y_0 – бастапқы уақыт мезетіндегі нүктенің координаттары; h_t, x_t, y_t – қайталама бақылау сәтіндегі координаттар.

Деформация жылдамдықтары келесі формула бойынша есептелді:

$$\vartheta = \frac{\Delta d}{\Delta t} \tag{4}$$

мұндағы Δd – жылжу шамасы; Δt – өлшеулер арасындағы уақыт аралығы.

InSAR-деректерін өңдеу. Кеңістікте таралған деформацияларды талдау үшін тұрақты шағылдырғыштар әдісімен (PS-InSAR) алынған интерферометриялық уақыттық қатарлар пайдаланылды. Интерферометриялық фаза φ келесі түрде өрнектеледі:

$$\varphi = \varphi_{def} + \varphi_{topo} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \tag{5}$$

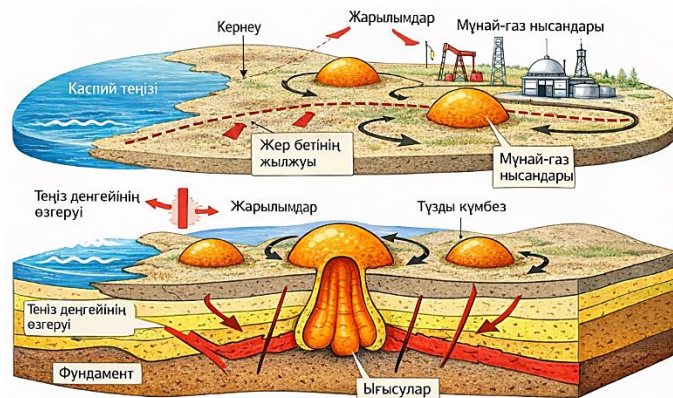
мұндағы φ_{def} – жер беті деформацияларымен шартталған фаза; φ_{topo} – топографиялық құрамдас бөлік; φ_{atm} – атмосфералық құрамдас бөлік; φ_{noise} – шу (кездейсоқ қателіктер) құрамдасы.

Деформациялық құрамдас бөлікті бөліп көрсету фазалық өлшеулерді сүзгілеу және уақыттық талдау арқылы жүзеге асырылды, бұл жылжуларды анықтау дәлдігін 1-2 мм-ге дейін жеткізуге мүмкіндік береді [7].

Кесте 1

Қолданылған әдістер және олардың сипаттамалары

Зерттеу әдісі	Анықталатын параметрлер	Кеңістіктік ауқым	Дәлдік
GNSS-бақылаулары	Тік және көлденең жылжулар	Жергілікті	1-3 мм
InSAR (PS)	Деформация өрістері	Аймақтық	1-2 мм
Құрылымдық талдау	Геодинамикалық алғышарттар	Аймақтық	Сапалық
Геодинамикалық модельдеу	Кернеулі күй	Аймақтық	Есептік



Сурет 1. Каспий үстіртіндегі деформациялық ығысулардың қалыптасуын айқындайтын геодинамикалық факторлардың сызбасы (тұзды күмбездер, жарылымдық аймақтар, шөгінді жамылғы)

1-сурет Каспий үстіртіндегі жер бетінің деформациялық ығысуларын қалыптастыратын негізгі геодинамикалық факторлардың сызбалық бейнесін көрсетеді. Сызбада өңірдің геологиялық құрылысының жоспарлық және қималық көріністері беріліп, тереңдік үдерістер мен олардың жер бетіндегі көріністері арасындағы өзара байланыс бейнеленген.

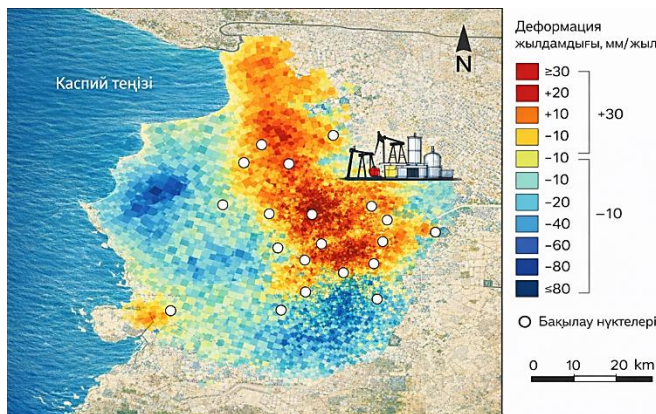
Қимада іргетастың үстінде жатқан шөгінді жамылғының құрылысы және тұзды күмбездердің дамуы көрсетілген. Реологиялық қасиеттерімен

ерекшеленетін тұзды құрылымдар жамылғы қабаттарында кернеулердің қайта бөлінуін туындататын белсенді құрылымдық элементтер ретінде әрекет етеді. Тұз массаларының жоғары бағытталған қозғалысы шөгінді жамылғының деформациялануына, созылу және сығылу аймақтарының қалыптасуына, сондай-ақ жер бетінің жергілікті ойыстары мен көтерілу құбылыстарының пайда болуына әкеледі.

Сызбада көрсетілген жарылымдық аймақтар тереңде орналасқан құрылымдардан жер бетіне дейін деформацияларды шоғырландыру және жеткізу арналарының рөлін атқарады. Олардың болуы деформациялық ығысулардың біркелкі еместігін және жоғары қозғалымдылық аймақтарының кеңістікте локализациялануын айқындайды. Жебелермен көрсетілген жылжу бағыттары тұзды-тектоникалық және аймақтық геодинамикалық үдерістердің өзара әрекеттесуі нәтижесінде туындайтын көлденең және тік деформациялардың сипатын көрсетеді.

Сызбаның жоғарғы бөлігінде Каспий теңізі деңгейінің ауытқулары және мұнай-газ нысандарының орналасуымен байланысты техногендік жүктеме сияқты сыртқы факторлардың әсері көрсетілген. Бұл факторлар жер бетіне жақын қабаттардың кернеулі-деформацияланған күйінің өзгеруіне әкеліп, табиғи деформациялық үдерістерді күшейтуі немесе олардың сипатын өзгертуі мүмкін.

Осылайша, ұсынылған сызба Каспий үстіртіндегі деформациялық ығысулардың қалыптасуы тұзды тектониканың, жарылымдық құрылымдардың, аймақтық кернеулердің және сыртқы табиғи-техногендік факторлардың бірлескен әсерімен анықталатынын айқын көрсетеді. Бұл жағдай инженерлік-геодезиялық мониторинг деректерін интерпретациялау және геодинамикалық тәуекелдерді бағалау кезінде ескерілуі қажет [1-4].



Сурет 2. InSAR деректері бойынша жер бетінің тік деформация жылдамдықтарының картасы

2-сурет спутниктік радиолокациялық интерферометрия (InSAR) деректері негізінде алынған Каспий үстірті аумағындағы жер бетінің тік деформация жылдамдықтарының кеңістіктік таралуын көрсетеді. Карта интерферометриялық өлшеулердің уақыттық қатарларын талдау негізінде құрастырылған және жер бетінің жылдық орташа жылжу жылдамдықтарын миллиметр/жыл бірлігінде бейнелейді.

Түстік шкала тік деформациялардың бағыты мен шамасын сипаттайды: теріс мәндер (көк-күлгін реңктер) жер бетінің шөгу аймақтарына сәйкес

келеді, ал оң мәндер (сары–қызыл реңктер) салыстырмалы көтерілу немесе компенсациялық деформациялар байқалатын аумақтарды көрсетеді. Ең жоғары шөгу жылдамдықтары зерттелген аумақтың орталық бөлігінде анықталған, мұнда тік жылжулардың мәндері ең үлкен теріс шамаларға жетеді. Бұл құбылыс тұзды-тектоникалық құрылымдардың дамуымен және техногендік әсерлермен байланысты болуы мүмкін.

Картада InSAR деректерін валидациялау және спутниктік өлшеулерді жерүсті GNSS-бақылауларымен салыстыру мақсатында пайдаланылатын инженерлік-геодезиялық мониторингтің бақылау нүктелері көрсетілген. Интенсивті деформация аймақтарының мұнай-газ нысандарының орналасуымен кеңістіктік сәйкестігі техногендік сипаттағы шөгулердің өңірдің табиғи геодинамикалық фонымен қабаттасу мүмкіндігін көрсетеді.

Деформациялық өрістің мозаикалық сипаты Каспий үстіртінің шөгінді жамылғысының құрылымдық әртектілігін, жарылымдық аймақтардың және кернеулердің қайта бөлінуінің жергілікті орталықтары ретінде әрекет ететін тұзды күмбездердің әсерін бейнелейді. Алынған нәтижелер InSAR әдістерінің жер бетінің баяу деформациялық үдерістерін анықтау мен талдаудағы жоғары ақпараттылығын және оларды инженерлік-геодезиялық бақылау міндеттерінде тиімді қолдануға болатынын растайды [7].



Сурет 3. Спутниктік мониторинг деректері бойынша бақылау нүктесінің тік ығысуларын сипаттайтын уақыттық қатар

3-сурет спутниктік InSAR мониторингі деректері негізінде алынған бақылау нүктесінің тік ығысуларын сипаттайтын уақыттық қатарды көрсетеді. Абсцисса осінде тоқсандық интервалмен берілген уақыт, ордината осінде – жер бетінің тік ығысулар шамасы миллиметрмен көрсетілген, мұнда теріс мәндер жер бетінің шөгуін, ал оң мәндер көтерілуін сипаттайды.

Уақыттық қатарды талдау тік ығысулардың орнықты төмендеуші трендін анықтайды, бұл бақылау нүктесі орналасқан аймақта жер бетінің үдемелі шөгу процесінің жүріп жатқанын дәлелдейді. Бақылаулардың бастапқы кезеңінде бірнеше миллиметрден аспайтын шамалы ығысулар тіркелсе, зерттелетін аралықтың соңына қарай шөгуінің жинақталған шамасы едәуір мәндерге жетеді. Бұл деформациялық процестің ұзақ мерзімді және квазисызықтық сипатқа ие екенін көрсетеді.

Графикте InSAR деректері бойынша алынған тік ығысулар мәндерімен қатар, жерүсті GNSS бақылаулары нәтижесінде тұрғызылған тегістелген трендтік қисық та ұсынылған. Спутниктік және жерүсті деректерінің жоғары

дәрежедегі сәйкестігі анықталған деформациялық трендтің сенімділігін және қолданылған мониторинг әдістемесінің дұрыстығын растайды.

Нүктелердің жалпы трендтік сызықтан жекелеген ауытқулары гидрогеологиялық жағдайлардың маусымдық өзгерістерімен, температура мен ылғалдылықтың ауытқуларымен, сондай-ақ спутниктік интерферометриялық әдістерге тән өлшеу қателіктерімен түсіндірілуі мүмкін. Дегенмен, уақыттық қатардың жалпы сипаты қысқа мерзімді тербелістерге қарағанда ұзақ кезеңді деформациялық процестердің басым екенін көрсетеді.

Алынған уақыттық қатар Каспий үстіртінде жер бетінің орнықты деформациялық ығысуларының бар екенін көрсетеді және ықтимал қауіпті геодинамикалық процестерді уақтылы анықтау мен болжау үшін тұрақты инженерлік-геодезиялық мониторинг жүргізудің қажеттілігін дәлелдейді [7].

Графиктер InSAR деректерінен алынған деформация жылдамдықтарының уақыттық қатарлары негізінде тұрғызылып, кейіннен аймақтың геодинамикалық және құрылымдық ерекшеліктерімен салыстырмалы талдау жүргізу арқылы өңделді.

Нәтижелердің сенімділігін бағалау. Деформациялық процестерді интерпретациялаудың сенімділігін арттыру мақсатында InSAR және GNSS деректерін өзара валидациялау қағидаты қолданылды. Тік ығысулардың бағыттарының және шамалар тәртібінің сәйкестігі анықталған деформациялық ығысулардың сенімділігін бағалаудың негізгі критерийі ретінде қарастырылды [6,7].

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Жүргізілген зерттеудің нәтижелері спутниктік радарлық интерферометрия (InSAR) деректерін, GNSS бақылауларын және құрылымдық-тектоникалық талдауды кешенді түрде өңдеуге негізделеді. Бұл тәсіл Каспий үстірті аумағындағы жер бетінің қазіргі заманғы деформациялық ығысуларының кеңістіктік-уақыттық заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді [8-10].

Деформациялық ығысуларының кеңістіктік таралуы. Жер бетінің тік деформацияларының жылдамдық карталарын талдау (2-сурет) деформациялық өрістің айқын кеңістіктік әртектілігін көрсетті. Тік ығысулардың ең жоғары теріс жылдамдықтары (шөгу) зерттелетін аумақтың орталық және солтүстік-шығыс бөліктерінде тіркелді, мұнда орташа жылдық мәндер жылына бірнеше миллиметрге дейін жетеді [11,12].

Анықталған қарқынды шөгу аймақтары кеңістіктік тұрғыдан тұзды-күмбезді құрылымдардың дамыған өңірлерімен және жарылымдық зоналармен сәйкес келеді. Бұл жер бетінің қазіргі деформациялық процестерінің қалыптасуында тұзды тектониканың жетекші рөл атқаратынын дәлелдейді [9,10]. Ал белсенді құрылымдардан алшақ орналасқан аймақтарда деформациялар әлсіз байқалады және ығысу жылдамдықтары нөлге жуық мәндермен сипатталады.

Тік және көлденең ығысуларды сандық бағалау келесі өрнек бойынша орындалды:

$$\Delta d = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (6)$$

мұндағы $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – бақылау кезеңі аралығында нүкте координаталарының өзгерістері [13].

Деформациялық процестердің уақыттық динамикасы. InSAR деректері бойынша алынған бақылау нүктелерінің тік ығысуларын сипаттайтын уақыттық қатарлар (1-график) жер бетінің шөгу процесінің ұзақ

мерзімді және квазисызықтық сипатын көрсететін орнықты төмендеуші трендтің бар екенін дәлелдейді [12,14]. Орташа деформация жылдамдықтары келесі формула бойынша анықталды:

$$\vartheta = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (7)$$

мұндағы Δd – ығысу шамасы, Δt – өлшеулер арасындағы уақыт интервалы [13].

Спутниктік деректерді GNSS бақылауларының нәтижелерімен салыстыру ығысулардың бағыттары мен шамаларының жоғары деңгейдегі сәйкестігін көрсетті, бұл анықталған деформациялық трендтердің сенімділігін растайды [14]. Жалпы трендтен жекелеген қысқа мерзімді ауытқулар гидрогеологиялық жағдайлардың маусымдық тербелістерімен және жер бетіне жақын грунттардағы кеуек қысымының өзгеруімен байланысты болуы мүмкін [11].



Сурет 4. InSAR және GNSS деректері бойынша жер бетінің тік деформацияларының уақыттық динамикасы

4-суретте спутниктік радарлық интерферометрия (InSAR) деректері негізінде алынған және GNSS бақылауларының нәтижелеріне сәйкес трендтік қисықпен аппроксимацияланған бақылау нүктесіндегі жер бетінің тік ығысуларын сипаттайтын уақыттық динамика көрсетілген [12-14].

Уақыттық қатарды талдау тік деформациялардың орнықты төмендеуші трендін анықтайды, бұл жер бетінің үдемелі шөгу процесінің жүріп жатқанын дәлелдейді. Қарастырылып отырған кезең ішінде тік ығысулардың жинақталған шамасы 10 мм-ден асады, бұл деформациялық процестің ұзақ мерзімді және квазисызықтық сипатқа ие екенін көрсетеді.

Спутниктік және жерүсті деректерінің арасындағы байқалатын сәйкестік анықталған деформациялық ығысулардың сенімділігін және қолданылған инженерлік-геодезиялық мониторинг әдістерінің дұрыстығын растайды [13,14]. Трендтен болатын шамалы ауытқулар гидрогеологиялық жағдайлардың маусымдық өзгерістерімен және жер бетіне жақын грунттардағы кеуек қысымының вариацияларымен түсіндірілуі мүмкін [11].

Тұзды-тектоникалық және жарылымдық құрылымдардың әсері. Құрылымдық-тектоникалық талдау (1-сурет) тұзды күмбездердің шөгінді жамылғы ішінде кернеулердің қайта бөлінуін бастайтын белсенді геодинамикалық элементтер рөлін атқаратынын көрсетті [9,10]. Тұз массаларының жоғары бағытталған қозғалысы жергілікті деформация

аймақтарының қалыптасуына әкеледі, ал бұл деформациялар жер бетіне біркелкі емес шөгуге және көтерілу түрінде көрініс табады.

Жарылымдық зоналар тереңдегі құрылымдардан жер бетіне деформацияларды жеткізетін арналар қызметін атқарады, бұл InSAR деректері бойынша анықталған деформациялық белсенділігі жоғары аймақтардың кеңістіктік шоғырлануын түсіндіреді [8,12].

Мониторинг әдістерін салыстырмалы сипаттау. Зерттеу нәтижелері деформацияларды мониторингтеуде спутниктік және жерүсті әдістерін кешенді қолданудың тиімділігін растайды (2-кесте).

Кесте 2

Мониторингтің әртүрлі әдістерімен алынған нәтижелерді салыстыру

Әдіс	Анықталатын деформациялар диапазоны	Кеңістіктік қамту	Сенімділік
GNSS	Нүктелік ығысулар	Жергілікті	Жоғары
InSAR (PS)	Деформациялық өрістер	Аймақтық	Жоғары
Құрылымдық талдау	Геодинамикалық алғышарттар	Аймақтық	Сапалық

Аталған әдістерді кешенді пайдалану деформацияларды тіркеумен қатар, оларды аймақтық геодинамика тұрғысынан интерпретациялауға мүмкіндік береді [13,14].

Алынған нәтижелер Каспий бассейнінің қазіргі кернеулі-деформацияланған күйі туралы бұрын жарияланған деректермен сәйкес келеді [8-11]. Қысқа мерзімді сейсмикалық әсерлерден айырмашылығы, анықталған деформациялық ығысулар баяу әрі жинақталатын сипатқа ие және инженерлік құрылыстар, соның ішінде мұнай-газ инфрақұрылымының желілік нысандары үшін әлеуетті қауіп төндіреді [19].

Осылайша, зерттеу нәтижелері Каспий үстіртінде аумақтардың орнықтылығын бағалау және инженерлік құрылыстарды жобалау кезінде тұрақты инженерлік-геодезиялық мониторинг жүргізудің, сондай-ақ геодинамикалық факторларды міндетті түрде ескерудің қажеттілігін растайды [13,14].

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу нәтижесінде геологиялық, құрылымдық-тектоникалық және инженерлік-геодезиялық деректерді кешенді талдау негізінде Каспий үстірті аумағында жер бетінің қазіргі деформациялық ығысуларының қалыптасуының геодинамикалық алғышарттары негізделді. Қазіргі деформациялық процестердің кеңістіктік әртекті және ұзақ мерзімді сипатқа ие екені анықталды, бұл тереңдік және жер бетіне жақын факторлардың күрделі өзара әрекеттесуімен түсіндіріледі.

Деформациялық ығысуларының қалыптасуында тұзды-күмбезді құрылымдар мен жарылымдық зоналардың шешуші рөл атқаратыны көрсетілді. Аталған құрылымдар шөгінді жамылғыдағы кернеулердің қайта бөлінуіне және олардың жер бетіне берілуіне ықпал ететін белсенді геодинамикалық элементтер ретінде әрекет етеді. Тік деформациялардың ең жоғары мәндері байқалатын аймақтардың тұзды күмбездер мен тектоникалық бұзылыстардың орналасуымен кеңістіктік сәйкестігі тұзды тектониканың өңірдің қазіргі кернеулі-деформацияланған күйіне айқындаушы әсерін растайды.

Спутниктік радарлық интерферометрия (InSAR) деректері мен GNSS бақылауларының талдауы негізінде Каспий үстіртінің жекелеген

учаскелерінде жер бетінің тік ығысуларында орнықты төмендеуші трендтердің бар екені анықталды, бұл олардың үдемелі шөгу процесіне ұшырап отырғанын көрсетеді. Алынған деформациялардың уақыттық қатарлары квазисызықтық сипатымен және жинақталу әсерімен ерекшеленеді, бұл маусымдық және климаттық факторлармен байланысты қысқа мерзімді тербелістерге қарағанда баяу геодинамикалық процестердің басым екенін дәлелдейді.

Нәтижелердің сенімділігі спутниктік және жерүсті геодезиялық деректерді өзара валидациялау арқылы расталды, бұл жер бетінің баяу деформациялық процестерін мониторингтеуде InSAR және GNSS әдістерін кешенді қолданудың жоғары тиімділігін көрсетеді. Аталған әдістерді пайдалану деформацияларды миллиметрлік дәлдікпен тіркеуге ғана емес, оларды аймақтық геодинамика тұрғысынан интерпретациялауға да мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелердің практикалық маңыздылығы оларды геодинамикалық тәуекелдерді бағалау және Каспий үстірті аумағындағы инженерлік құрылыстар мен мұнай-газ инфрақұрылымы нысандарының қауіпсіз пайдаланылуын қамтамасыз ету кезінде қолдану мүмкіндігімен айқындалады. Анықталған деформациялық ығысулардың заңдылықтары инженерлік-геодезиялық мониторинг бағдарламаларын әзірлеуде, сондай-ақ геодинамикалық тұрғыдан белсенді өңірлерде құрылыстарды жобалау мен пайдалану бойынша нормативтік талаптарды жетілдіруде пайдаланылуы мүмкін.

Осылайша, орындалған зерттеу Каспий бассейніндегі қазіргі геодинамикалық процестер туралы түсініктерді дамытуға үлес қосады және жер бетінің деформациялық ығысуларының талдауы мен болжамын жасау үшін геологиялық, геофизикалық және геодезиялық әдістерді біріктіруге негізделген кешенді тәсілдің қажеттілігін растайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Brunet M.F., Korotaev M., Ershov A. et al. The Palaeozoic–Mesozoic evolution of the Precaspian Basin // *Marine and Petroleum Geology*. – 2020. – Vol. 112. – P. 104094.
2. Stephenson R.A., Mart Y. Subsidence mechanisms in the Caspian Basin // *Tectonophysics*. – 2020. – Vol. 796. – P. 228646.
3. Hudec M.R., Jackson M.P.A. The salt mine: A digital atlas of salt tectonics // *AAPG Memoir*. – 2021. – No. 99.
4. Ibrashiev K.N., Akhmetzhanov A.Zh., Zhemchuzhnikov V.G. Salt tectonics of the North Caspian Basin // *Kazakhstan Journal for Oil & Gas Industry*. – 2024. – Vol. 6. – No. 2. – P. 8-24.
5. Nouri A., Rahimi B., Vavryčuk V. Tectonic stress around the South Caspian Basin deduced from earthquake focal mechanisms // *International Geology Review*. – 2024. – Vol. 66. – No. 17. – P. 3075-3092.
6. Suzanne A.G. Leroy P.J. Reimer H.A.K., Lahijani Abdolmajid N.B., Eberhard S. et al. Caspian Sea levels over the last 2200 years, with new data from the S-E corner // *Geo morphology*. – 2022. – 403. – P. 108136.
7. Bayramov E. et al. Remote Surveillance of Differential Deformation for Kazakhstan Offshore Kashagan Oilfield Using Microwave Satellite Remote Sensing // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15. – No. 19. – C. 4754.
8. Trifonov V.G., Karakhanian A.S. Active faulting and tectonics of the Caspian region // *Tectonophysics*. – 2015. – Vol. 637. – P. 1-15.

9. Jackson J., Priestley K., Allen M., Berberian M. Active tectonics of the South Caspian Basin // *Geophysical Journal International*. – 2016. – Vol. 205. – No. 3. – P. 1493-1511.
10. Hudec M.R., Jackson M.P.A. Advances in salt tectonics: Understanding salt structures and deformation // *AAPG Bulletin*. – 2017. – Vol. 101. – No. 9. – P. 1411-1440.
11. Shi X., Zhang L., Wang J. Influence of groundwater and seasonal factors on surface deformation revealed by InSAR // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. – Vol. 211. – P. 271-285.
12. Amelung F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A., Lacznik R.J. Sensing deformation of the Earth's surface with InSAR // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. – 2019. – Vol. 47. – P. 241-270.
13. Teunissen P.J.G., Montenbruck O. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. – Cham: Springer, 2017. – 1349 p.
14. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2001. – Vol. 39. – No. 1. – P. 8-20.

Материал редакцияға 15.01.26 түсті, 11.03.26 қабылданды.

Г.М. Отарбаева¹, Д.Ж. Артықбаев², Ж. Бердалиева³, М.Т. Куттыбай², Ж.А. Үсенқұлов²

¹*Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

²*Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова,
Шымкент, Казахстан*

³*Казахская головная архитектурно-строительная академия, Алматы, Казахстан*

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРИКАСПИЙСКОМ ПЛАТО

Аннотация. В статье рассматриваются геодинамические предпосылки формирования современных деформационных сдвижений земной поверхности на территории Прикаспийского плато. Исследование основано на комплексном анализе геологических, структурно-тектонических и инженерно-геодезических данных, характеризующих пространственно-временные особенности деформационных процессов. Для количественной оценки деформационных сдвижений использованы данные спутниковой радарной интерферометрии (InSAR) и глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS), обеспечивающие миллиметровую точность определения вертикальных и горизонтальных смещений. Анализ карт скоростей деформаций и временных рядов показал выраженную пространственную неоднородность деформационного поля и наличие устойчивых нисходящих трендов вертикальных смещений, свидетельствующих о прогрессирующем оседании отдельных участков земной поверхности. Установлено, что максимальные скорости деформаций приурочены к зонам развития соляных куполов и тектонических нарушений, а также усиливаются под воздействием внешних природных и техногенных факторов. Полученные результаты подтверждают эффективность комплексного применения InSAR и GNSS-методов для мониторинга медленных геодинамических процессов и могут быть использованы при оценке геодинамических рисков, проектировании и эксплуатации инженерных сооружений и объектов нефтегазовой инфраструктуры на территории Прикаспийского плато.

Ключевые слова: геодинамика, деформационные сдвигения, Прикаспийское плато, соляная тектоника, земная поверхность, InSAR, GNSS, инженерно-геодезический мониторинг, осадочный чехол, геодинамические риски.

G.M. Otarbayeva¹, D.Zh. Artykbaev², Zh. Berdaliyeva³, M.T. Kutybay², Zh.A. Usenkulov²

¹*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

²*M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan*

³*Kazakh National Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty, Kazakhstan*

GEODYNAMIC PREREQUISITES FOR DEFORMATIONAL DISPLACEMENTS OF THE EARTH'S SURFACE ON THE CASPIAN PLATEAU

Abstract. The article examines the geodynamic prerequisites for the formation of modern deformation displacements of the Earth's surface within the territory of the Caspian Lowland Plateau. The study is based on an integrated analysis of geological, structural-tectonic, and engineering-geodetic data that characterize the spatial and temporal features of deformation processes. For the quantitative assessment of deformation displacements, data from satellite radar interferometry (InSAR) and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) were used, providing millimeter-level accuracy in determining vertical and horizontal displacements. The analysis of deformation velocity maps and time series revealed pronounced spatial heterogeneity of the deformation field and the presence of stable downward trends in vertical displacements, indicating progressive subsidence of individual surface areas. It was established that the maximum deformation rates are confined to zones of salt-dome development and tectonic disturbances and are further intensified under the influence of external natural and anthropogenic factors. The obtained results confirm the effectiveness of the integrated application of InSAR and GNSS methods for monitoring slow geodynamic processes and can be used in geodynamic risk assessment, as well as in the design and operation of engineering structures and oil and gas infrastructure facilities within the Caspian Lowland Plateau.

Keywords: geodynamics, deformation displacements, Caspian Lowland Plateau, salt tectonics, Earth's surface, InSAR, GNSS, engineering-geodetic monitoring, sedimentary cover, geodynamic risks.