

Шаған көлінің соңғы 30 жылдағы гидроэкологиялық динамикасын ғарыштық және геоақпараттық әдістер арқылы зерттеу

Меруерт Мұсабаева, Шалқар Шахарбек*

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; mussabayeva_mn@enu.kz, shalkar.shex111@gmail.com
Корреспонденция: shalkar.shex111@gmail.com

Аңдатпа: Бұл зерттеу мақаласы Шаған көлінің кеңістіктік-уақыттық динамикасын талдауға арналған. Ғылыми зерттеудің негізгі мақсаты - 1995 жылдан 2025 жылға дейінгі кезеңдегі су айдынының аумақтық өзгерістерінің сандық бағасын беру және осы өзгерістерге әсер еткен климаттық детерминанттарды, сондай-ақ көлдің пайда болуына байланысты антропогендік әсер ететін факторларды анықтау. Зерттеу әдістемесі Landsat 5, 8 және Sentinel-2 ғарыштық деректерін қамтиды, олар Google Earth Engine (GEE) платформасында өңделіп, Normalized Difference Water Index (NDWI) есептелді. Нәтижелерді салыстыру ArcGIS Pro геоақпараттық жүйесіндегі Union Overlay кеңістіктік талдау арқылы жүзеге асырылды. Зерттеу жұмысының негізгі нәтижелері көрсеткендей, отыз жыл ішінде көлдің су бетінің ауданы 17,3 %-ға (1,82 км²-ден 1,50 км²-ге дейін) қысқарған. Бұл қысқару аймақтық климаттың жылынуымен және табиғи өзгерістердің артуымен тікелей байланысты. Жүргізілген зерттеудің мәні – Семей полигоны аумағындағы ерекше гидрогеологиялық нысанның экожүйелік тұрақсыздығын дәлелдеу және оның радионуклидтермен (тритий, плутоний) ластану жағдайындағы геоэкологиялық қауіпсіздігін бағалауға қосқан үлес. Жұмыс нәтижелерінің практикалық мәні су ресурстарын орнықты басқару стратегияларын қалыптастыруда маңызды ғылыми-әдіснамалық негіз болады.

Дәйексөз: Мұсабаева, М., Шахарбек, Ш. (2026). Шаған көлінің соңғы 30 жылдағы гидроэкологиялық динамикасын ғарыштық және геоақпараттық әдістер арқылы зерттеу. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География сериясы, 155(2), 170-181.
<https://doi.org/10.32523/3107-278X-2026-155-2-170-181>

Академический редактор:
Н.Е. Рамазанова

Редакцияға түсті: 05.02.2026
Түзетілді: 26.04.2026
Қабылданды: 25.05.2026
Басылымға шықты:
30.06.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Түйін сөздер: Шаған көлі; NDWI; ArcGIS; климаттық өзгеріс; су балансы; геоақпараттық талдау; атомдық мұра.

1. Кіріспе

Шаған көлі Қазақстанның гидрологиялық жүйесіндегі ерекше нысан болып табылады, өйткені ол табиғи генезиске емес, 1965 жылы жүргізілген жер асты ядролық сынағының нәтижесінде пайда болған геоинженерлік мұра. Бұл кратерлік көлдің қалыптасуы және одан кейінгі геоэкологиялық эволюциясы климаттық өзгерістердің және Семей ядролық полигонының қалдық радиациялық әсерінің күрделі өзара байланысын көрсетеді. 1965 жылғы 15 қаңтарда қуаты 140 килотонна болатын жер асты ядролық жарылыс нәтижесінде тереңдігі 100 метрден асатын және диаметрі 430 метрді құрайтын кратер пайда болды (Glasstone & Dolan, 1977).

Бұл оқиға КСРО-ның «Халық шаруашылығына арналған

ядролық жарылыстар» (PNE) бағдарламасы бойынша су қоймаларын жасау мақсатында жүргізілген алғашқы сынақ болды. Бұл сынақ АҚШ-тың «Project Plowshare» бағдарламасындағы Sedan кратерлік жарылысының (104 кт) «дерлік клоны» ретінде сипатталды, мақсаты үлкен конустық кратерді жасау болды. Кратер көктемгі сумен толтырылғаннан кейін пайда болған «Атом көлі» бүгінде экологиялық тұрғыда ерекше бақылаудағы аймақ болып табылады (Abdrakhmanov et al., 2019).

Климаттың жаһандық өзгеруі, трансэвапорацияның артуы және аймақтық су ағысының азаюы Шаған көлінің гидрологиялық тепе-теңдігіне айтарлықтай әсер етуде (IPCC, 2021).

Орталық Азияның құрғақ аймақтарындағы су айдындарының мониторингі үшін NDWI (Normalized Difference Water Index) және Google Earth Engine (GEE) сияқты бұлттық есептеу платформаларын қолдану су ресурстарының кеңістіктік-уақыттық өзгерісін бағалаудың тиімді геоақпараттық әдісі ретінде қарастырылады. Алайда, Шаған көлі сияқты техногендік генезисі бар және радиациялық ластануы бар су нысандарының ұзақ мерзімді динамикасын кешенді талдау – экожүйелік қауіпсіздікті бағалау үшін өзекті ғылыми міндет болып қалады. Бұл нысанды Koldobskaya et al. (2018) сияқты зерттеушілер ядролық жарылыстардың гидрогеологиялық салдарын зерттеу контекстінде қарастырған.

Бұл зерттеудің мақсаты - ғарыштық және геоақпараттық талдау негізінде Шаған көлі су айдынының 1995–2025 жылдардағы морфометриялық динамикасын бағалауға байланысты факторлар мен корреляциясын анықтау.

2. Материалдар мен әдістер

2.1. Зерттеу аймағы

Шаған көлі Абай облысының батыс бөлігінде, бұрынғы Семей ядролық сынақ полигоны аумағында (Balapan аймағы) орналасқан (49.9°N, 79.1°E). Көлдің ұзындығы шамамен 1,5 км, ені 400–800 м аралығында, орташа тереңдігі 90–100 м. Аймақтың климаты - шұғыл континенттік, жазы ыстық әрі құрғақ. Бұл климаттық ерекшелік жоғары булануға және су айдындарының үлкен маусымдық ауытқуына әкеледі.

2.2. Деректер көздері

Зерттеу барысында 1995–2025 жылдар аралығын қамтитын көп жылдық спутниктік мәліметтер пайдаланылды. Барлық суреттер Google Earth Engine (GEE) платформасынан алынған. Су айдындарының динамикасын анықтау үшін Normalized Difference Water Index (NDWI) қолданылды. Сонымен қатар, Шаған көлінің айналасында техногендік үйінділер мен минералданған топырақтың басым болуын ескере отырып, су мен құрлық шекарасын, әсіресе таяз сулы аймақтарда дәлірек анықтау мақсатында MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) индексі қосымша зерттеу құралы ретінде қарастырылды.

GEE платформасы бұлттылық пен атмосфералық кедергілердің әсерін азайту үшін медианалық композиттерді құруға мүмкіндік береді, бұл кең ауқымды және ұзақ мерзімді гидрологиялық мониторинг жүргізуде ерекше тиімді құрал болып саналады. Спутниктік деректер алдын ала радиометриялық және атмосфералық түзетулерден өтті. Атап айтқанда, Landsat миссиясының мәліметтері Surface Reflectance (SR) форматында, ал Sentinel-2 деректері Level-2A өнімдері түрінде қолданылды. Бұл форматтар атмосфералық шашырау мен абсорбция әсерін азайтып, жер бетінің нақты шағылысу коэффициенттерін алуға мүмкіндік береді.

Google Earth Engine ортасында деректерді алдын ала өңдеу барысында бұлттылық пен көлеңкелерді жою үшін сапа масклары (quality masks) қолданылды. Сонымен қатар, әрбір зерттеу жылы үшін бірнеше спутниктік суреттер біріктіріліп, медианалық композиттер қалыптастырылды. Мұндай тәсіл кездейсоқ шумдарды азайтып, су айдыны шекараларын тұрақты түрде анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеуде уақыттық кезеңді таңдау маңызды әдістемелік кезеңдердің бірі болды. Су айдынының көктемгі максималды деңгейін емес, жазғы маусымдағы (шілде–тамыз)

салыстырмалы түрде тұрақты гидрологиялық жағдайды сипаттайтын композиттер пайдаланылды. Бұл кезеңде қар ерігеннен кейінгі маусымдық тасқындар аяқталып, көл деңгейі салыстырмалы түрде тұрақты күйге келеді. Сондықтан жазғы кезеңге негізделген композиттер көпжылдық гидрологиялық трендтерді анықтау үшін анағұрлым репрезентативті болып табылады.

Кесте 1. Су айдындарының динамикасын анықтау

Дерек көзі	Спутник / Сенсор	Уақыт аралығы	Кеңістіктік рұқсат
USGS	Landsat 5 TM Multispectral	1995, 2000, 2005	30 м
Landsat 8	OLI/TIRS Multispectral	2010, 2015	30 м
Copernicus	Sentinel-2A/B MSI	2025	10–20 м

Су айдындарының динамикасын анықтау үшін Normalized Difference Water Index (NDWI) қолданылды (Carlsson, Ramebäck, 2001):

Спектралды комбинациялар:

- Landsat 8 OLI: (Green = Band 3; NIR = Band 5) (Carlsson, Ramebäck, 2001)
- Sentinel-2 MSI: (Green = Band 3; NIR = Band 8)
- Landsat 5 TM: (Green = Band 2; NIR = Band 4)

NDWI > 0.1 болатын мәндер су аймағы ретінде бинарлы жіктеуден өткізілді. Бұл шекті мән NDWI-ді қолдану бойынша Макфитерс ұсынған бастапқы әдістемеге негізделген және су объектілерін фондық шулардан сәтті ажыратуға мүмкіндік берді (Carlsson, Ramebäck, 2001).

ArcGIS Pro бағдарламасында NDWI нәтижелері Union Overlay топологиялық талдауы арқылы көл бетінің кеңістіктік қиылысу картасын жасауға мүмкіндік берді. Overlay талдау әр жылдағы су айдыны полигондарын біріктіру арқылы көл ауданының қанша пайызы тұрақты екенін және қанша пайызы уақытша (транзиттік) сипатта екенін анықтау үшін қолданылады.

Атмосфералық кедергілерді жою үшін келесі алгоритмдер қолданылды:

• LaSRC (Landsat Surface Reflectance Code): Landsat 8 мәліметтері үшін аэрозольдік оптикалық қалыңдықты және су буын ескере отырып, беткі шағылысу коэффициентін (Surface Reflectance) алу үшін пайдаланылды.

• Sen2Cor: Sentinel-2 мәліметтері үшін 2A деңгейіне дейін атмосфералық түзету жасау үшін қолданылды. Бұл алгоритм рельефті, тропосфералық аэрозольдерді және су буын ескереді.

Су мен құрлық арасындағы шекараны дәлірек анықтау үшін Оцу (Otsu) алгоритмі пайдаланылды. Оцу әдісі гистограммадағы класаралық дисперсияны максималдау арқылы әр сурет үшін оңтайлы шекті мәнді автоматты түрде таңдауға мүмкіндік береді, бұл маусымдық жарықтандыру мен топырақ ылғалдылығының әсерін азайтады.

Дәлдікті бағалау (Accuracy Assessment)

Классификация нәтижелерінің дәлдігін тексеру үшін 100-ден астам кездейсоқ таңдалған бақылау нүктелері арқылы Қателіктер матрицасы (Confusion Matrix) құрылды. Landsat 5 (30 м) және Sentinel-2 (10 м) спутниктерінің кеңістіктік рұқсат айырмашылығының нәтижеге әсерін саралау үшін Каппа (Карра) коэффициенті әр зерттеу кезеңі (1995, 2010, 2025 жж.) бойынша жеке есептелді. Негізгі көрсеткіштер:

- Объектінің шын мәнінде қаншалықты дұрыс жіктелгенін көрсетеді.
- Картадағы ақпараттың сенімділік деңгейі.
- Каппа коэффициенті: Жіктеудің кездейсоқ сәйкестіктен қаншалықты жақсы екенін білдіретін статистикалық өлшем.

Гидрологиялық трендтерді талдау (Mann-Kendall және Sen's Slope)

Көл ауданының көпжылдық өзгеру үрдісін бағалау үшін параметрлік емес

статистикалық тесттер қолданылды:

1. Манн-Кендалл (Mann-Kendall) тесті: Уақыт қатарындағы монотонды трендтің бар-жоғын анықтау үшін пайдаланылды. Статистикалық маңыздылық деңгейі ($p < 0,05$ деп алынды.

2. Сен (Sen's Slope) көлбеуінің бағалаушысы: Трендтің қарқындылығын, яғни уақыт бірлігіндегі (жыл/онжылдық) ауданның нақты өзгеру шамасын есептеу үшін қолданылды.

3. Нәтижелер

3.1. Су беті ауданының динамикасы

NDWI талдауы бойынша, Шаған көлінің су беті ауданы 1995 жылдан 2025 жылға дейін ұзақ мерзімді кезеңде 17,3 %-ға қысқарған (2-кесте). Бұл қысқару климаттың құрғақтануының айқын гидрологиялық реакциясы болып табылады, сонымен қатар аймақтағы буланудың күшеюімен және су балансының теріс өзгерістерімен тығыз байланысты. Зерттеу нәтижелері көл экожүйесінің климаттық өзгерістерге жоғары сезімтал екенін көрсетеді.

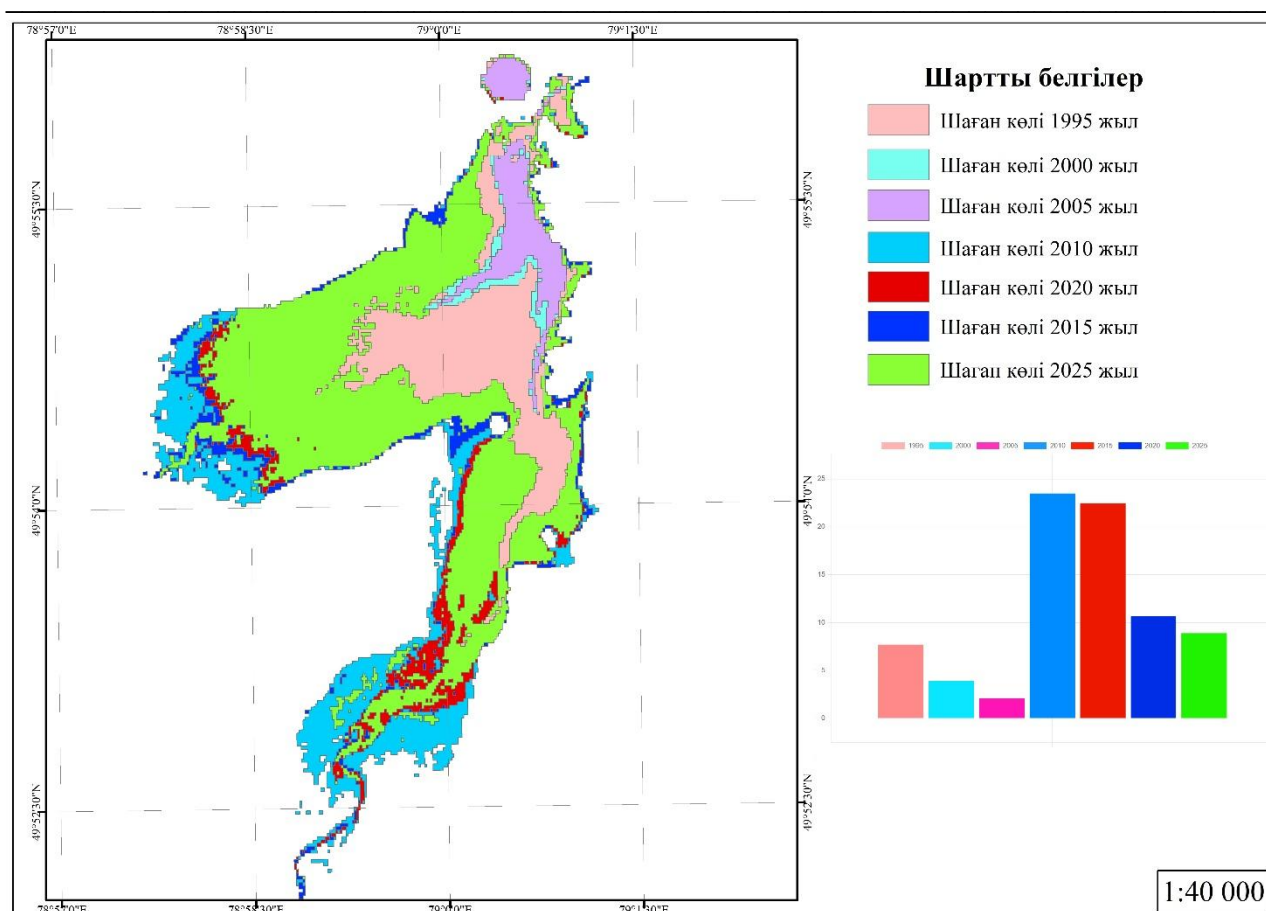
Кесте 2. Шаған көлі су беті ауданының динамикасы (1995–2025 жж.)

Жыл	Су беті ауданы (км²)	Өзгеріс (%)	Ескертпе
1995	1.82	—	Бастапқы кезең
2000	1.94	+6.6	Жауын-шашын жоғары кезең
2005	1.88	–3.0	Қалыпты маусым
2010	1.73	–8.0	Булану артуы
2015	1.62	–6.4	Құрғақ кезең
2025	1.50	–7.4	Климаттық әсер

Көлдің су айдынының кезеңдік өзгерісі 1-суретте айқын көрсетілген.

Манн-Кендалл тесті бойынша Шаған көлінің ауданында айқын теріс тренд анықталды ($p < 0,05$), бұл ұзақ мерзімді су бетінің қысқаруын көрсетеді. Ең үлкен су беті ауданы 2000 жылы тіркелсе, ең төменгі деңгей 2025 жылы байқалды, яғни 25 жыл ішінде көл ауданы шамамен 22.7 % төмендеді. Overlay талдауы бойынша су айдынының 60 %-дан астамы уақытша сипатқа ие, бұл оның климаттық құбылмалылыққа жоғары тәуелділігін растайды.

Маусымдық гидрологиялық талдау көрсеткендей, жазғы құрғақ кезеңдерде көлдің орташа су көлемі қысқарады, ал көктемгі қар еріген кезде уақытша артықшылыққа ие аймақтар пайда болады. Су деңгейінің төмендеуі негізінен жауын-шашын мөлшерінің азаюы мен булану жылдамдығының артуымен байланысты. Алынған нәтижелер Шаған көлінің су қорын тиімді басқару және климаттық өзгерістерге бейімделу стратегияларын әзірлеу қажеттігін көрсетеді.



Сурет 1. Шаған көлі су бетінің уақыттық өзгерісі (1995–2025 жж.)

Шаған көлінің 1995 жылдан 2025 жылға дейінгі аралықтағы су бетінің уақыттық өзгерістеріне жүргізілген картографиялық талдау нысанның айқын гидроморфологиялық трансформациясын көрсетті. 1-суреттегі деректерді ғылыми сараптау нәтижесінде көл акваториясының дамуын екі негізгі функционалдық аймаққа бөліп қарастыруға болады.

Біріншіден, су айдынының ең тұрақты бөлігі немесе гидрологиялық ядросы (hydrological core) көлдің орталық кратерлік зонасында шоғырланған. Бұл сегмент бақылау жүргізілген барлық кезеңдерде өзінің су жинақтаушы қабілетін жоғалтпаған ең терең және гидрогеологиялық тұрғыдан орнықты бөлік болып табылады. Орталық ойпаттың мұндай тұрақтылығы жерасты суларының дренаждық толығуы мен булану үдерістері арасындағы тепе-теңдіктің сақталуымен түсіндіріледі. Бұл «өзектік» зона су деңгейінің ең төменгі регрессиялық фазаларында да статикалық су қабатын ұстап тұрып, нысанның жалпы экожүйесінің деградацияға қарсы буферлік қабілетін айғақтайды.

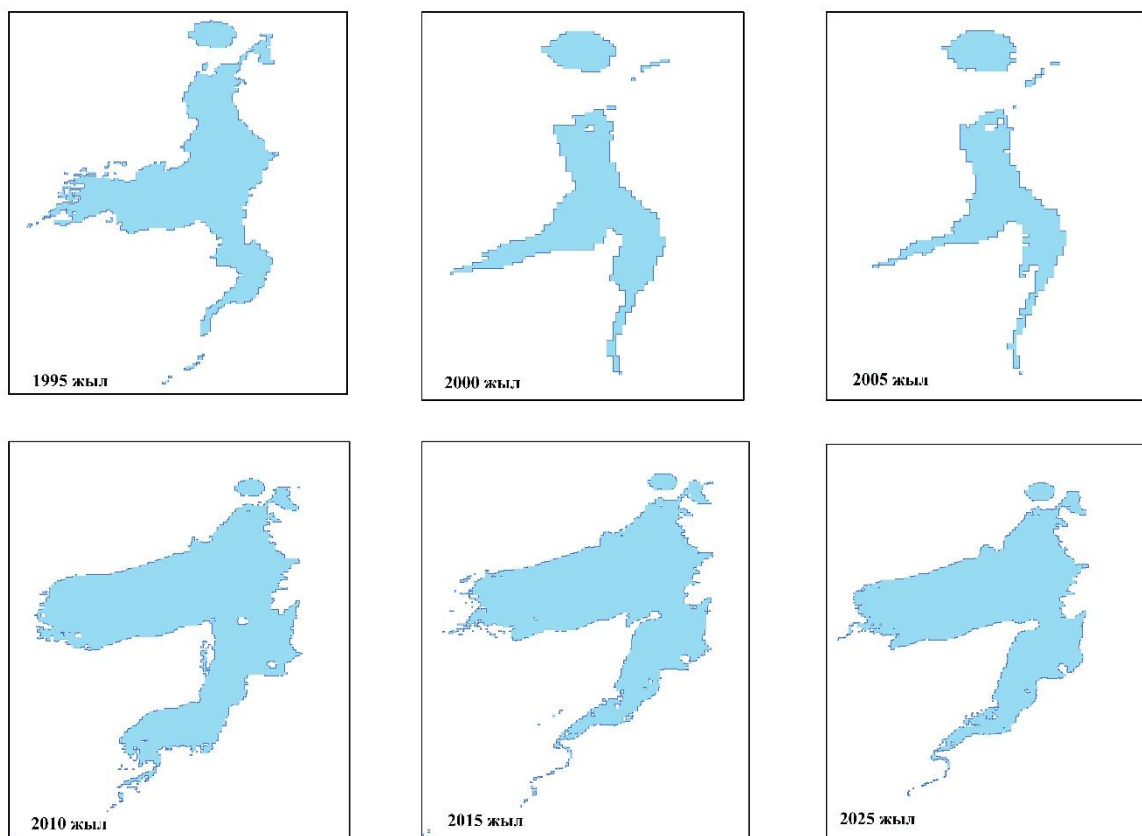
Екінші жағынан, көлдің перифериялық және маргиналды аймақтарында максималды динамикалық тербелістер мен жоғары экодинамикалық градиент байқалады. 1995 жылғы базалық контур мен 2025 жылғы шекаралар арасындағы алшақтық су айдынының эфемерлі сипатын көрсетеді. Гистограммалық мәліметтер бойынша, 2010 және 2020 жылдары орын алған трансгрессиялық фазалар (су бетінің максималды кеңеюі) жауын-шашынның экстенсивті мөлшеріне тәуелді болса, 2005 және 2025 жылдардағы регрессиялық құбылыстар периметрлік құрғаудың басымдылығын айқындайды. Бұл жағдайда таяз жағалаулық зоналарда буланудың инфильтрациядан басым түсуі есебінен «су айнасының» жиырылуы (water mirror contraction) орын алады.

Шаған көлінің су режимі - климаттық аридтену үдерістері мен жергілікті ландшафтық ерекшеліктердің әсерінен қалыптасатын күрделі динамикалық жүйе. Көлдің солтүстік-батыс және оңтүстік бөліктеріндегі таяз сулы аумақтар ылғал тапшылығына бірінші кезекте жауап

беретін индикаторлық зоналар болып табылады.

3.2. Кеңістіктік қиылысу (Overlay) талдауы

Union Overlay талдауы (2-сурет) көлдің аумақтық динамикасындағы кеңістіктік гетерогенділікті нақтылады.



Сурет 2. Шаған көлі су айдыны шекараларының кеңістіктік қиылысуы (Overlay) және аудандық динамикасы (1995–2025 жж)

Union Overlay (біріктіру) талдауының нәтижелеріне сүйене отырып, келесідей негізгі қорытындылар жасауға болады: Көлдің аумағы уақыт өте келе тұрақсыз болғаны байқалады. Динамиканы екі негізгі кезеңге бөлуге болады:

- 1995–2005 жж. (Тартылу кезеңі): Су айдынының ауданы айтарлықтай қысқарған. Әсіресе көлдің батыс және солтүстік-шығыс бөліктерінде су деңгейі төмендеп, жекелеген кішігірім су айдындарына (фрагментация) бөлінгені көрінеді.

- 2010–2025 жж. (Толығу және тұрақтану): 2010 жылдан бастап көл аумағы қайта кеңейген. Батыс шығанағының ауданы ұлғайып, көл біртұтас формаға келе бастаған. 2025 жылғы болжам/көрсеткіш көлдің 2010-2015 жылдардағы қалыпты деңгейін сақтап тұрғанын көрсетеді.

Overlay әдісі арқылы көлдің қай бөліктері жиі өзгеріске ұшырайтынын (гетерогенділік) анықтауға болады:

Тұрақсыз аймақтар: Көлдің батыс жағы мен оңтүстік "құйрығы" ең жоғары кеңістіктік өзгергіштікке ие. Бұл аймақтарда су тереңдігі таяз болуы мүмкін, сондықтан климаттық немесе антропогендік факторларға тез жауап береді.

Тұрақты өзек (Core): Орталық бөлік барлық жылдары сақталған, бұл көлдің негізгі терең қазаншұңқыры осы аймақта орналасқанын білдіреді.

Мүмкін болатын себептер мен салдар: 2000-жылдардың басындағы құрғақшылық

немесе жауын-шашынның азаюы судың тартылуына әкелуі мүмкін. Шаған көлінің (Атом көлі) жасанды шығу тегін ескерсек, су деңгейіне жергілікті өзендердің (Шаған, Ащысу) ағысы мен дамбалардың жай-күйі тікелей әсер етеді. Overlay талдауы су жағалауындағы экожүйелердің (қамыс, жағалау өсімдіктері) де тұрақсыз екенін көрсетеді. Бұл биологиялық әртүрлілікке және ластаушы заттардың концентрациясына әсер етуі мүмкін.

Талдау барысында келесі техникалық принциптер қолданылды:

- Cracking және Clustering: Бұл процесс полигон жиектерінің қиылысу нүктелерінде жаңа төбелерді (vertices) енгізуді және берілген төзімділік шегіндегі (tolerance) түйіндерді біріктіруді қамтиды. Бұл әдіс су айдыны шекараларының уақыттық ығысуын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік берді.

- Кеңістіктік жіктеу: Overlay талдауының нәтижесінде көлдің екі негізгі аймағы анықталды:

Тұрақты су айдыны (Core Water): Барлық зерттелген жылдарда су астында болған аумақтар. Бұл аймақ көлдің орталық кратерлік бөлігіне сәйкес келеді, мұнда тереңдік 80–90 метрді құрайды және су алмасуы шектеулі.

Уақытша (транзиттік) су айдыны (Transient Water): Климаттық факторларға байланысты мезгіл-мезгіл құрғап қалатын немесе су басатын перифериялық аймақтар. Зерттеу мәліметтері бойынша, Шаған көліндегі уақытша су айдындарының үлесі 60 %-дан асады, бұл гидрологиялық режимнің климаттық құбылмалылыққа өте жоғары тәуелділігін көрсетеді. Кеңістіктік қиылысу картасы су деңгейі төмендеген кезде периметрлік құрғаудың негізінен көлдің шығыс және оңтүстік-шығыс жайылмалық бөліктерінде жүретінін көрсетті. Бұл аймақтарда жағалау сызығының шегінуі 30 жылда 100-150 метрге дейін жеткен.

4. Талдау

4.1. Климаттық детерминанттар

Шаған көлінің су айдынының қысқаруы аймақтық климаттың жылынуымен тығыз байланысты. Жылыну эвапотранспирацияны күшейтіп, көлдің су балансындағы тапшылықты арттырады. Сонымен қатар, су көлемінің азаюы CHIRPS деректері бойынша аймақтық жауын-шашын мөлшерінің төмендеуімен де тығыз байланысты, және бұл айнымалылар арасындағы корреляция (Пирсон және Спирмен) климаттық факторлардың су айдынына тікелей әсерін дәлелдейді.

Шаған көліндегі ластану деңгейі судың тереңдігіне байланысты гетерогенді. Тұрақты изотоптарды (^2H және ^{18}O) зерттеу көлдің гидрологиялық режимін түсінуге мүмкіндік берді.

Көл суының вертикалды стратификациясы:

- Жоғарғы қабат (0–20 м): Атмосфералық жауын-шашынмен белсенді алмасады. Мұнда тритий (^3H) концентрациясы 160–500 Бк/кг, минералдануы 10 г/л.

- Төменгі қабат (20–90 м): Су алмасуы жоқ стагнациялық аймақ. Тритий белсенділігі 20,000 Бк/кг-ға дейін жетеді, минералдану 20 г/л болады.

Зерттеулер Шаған көлінен шығатын жерасты сулары Шаған өзенінің төменгі ағысын (2–14 км) тритиймен (300,000–350,000 Бк/кг) тұрақты түрде ластайтынын растады.

4.2. Техногендік мұра және гидрогеохимиялық қауіптер

1. Көлдің генезисі және биологиялық тұрақсыздығы: Шаған көлінің техногендік генезисі оның бастапқы экожүйесін бұзды. 1960 жылдардың соңында көлде қалдық радиацияның тірі ағзаларға әсерін зерттеу үшін эксперименттер жүргізіліп, 36 балық түрі, 27 моллюска және 150-ге жуық су өсімдіктері енгізілді. Бұл түрлердің 90 %-ы жерсінбей, кейіннен жойылды, бұл көлдің қалдық радиациялық ортасының биологиялық тұрақсыздығын дәлелдейді.

2. Радионуклидтердің ластануы: Баларап аймағындағы топырақ үлгілерінде қарулық плутониймен байланысты плутонийдің және цезийдің жоғары деңгейдегі ластануы анықталған. Көлге су жеткізетін арналарда тритийдің (H) жоғары концентрациясы тіркелген

(S_R19). Тритийдің болуы жерасты суларының және ядролық жарылыспен туындаған жарықтар жүйесі арқылы ластанған ағындардың латералды миграциясының негізгі индикаторы болып табылады.

3. Ауыр металдардың шоғырлануы: Су айдынының 17,3 %-ға қысқаруы судың тұздылығын және ауыр металдардың концентрациясын арттырады. Микроэлементтердің мөлшері әлемдік өзен суларының орташа концентрациясымен салыстырғанда келесідей ретпен таралған: Уран (U) > Қорғасын (Pb) > Мырыш (Zn) > Лантан (La) > Стронций (Sr) > Марганец (Mn) (S_R19).

Гидрологиялық және геопространдықтық интерпретация: Шаған көлі бойынша алынған 17,3 % қысқару нәтижесі (1-кесте) Орталық Азияның аридті аймақтарындағы жалпы климаттық құрғақтану үрдісімен корреляцияланады (Huang et al., 2023). Overlay талдау нәтижесі (2-сурет) су айдынының қысқаруы көлдің терең кратерлік бөлігіне қарағанда, таяз, маргиналды аймақтарда айқынырақ жүріп жатқанын көрсетті. Бұл булануға және ауыр металдардың шөгуіне ең сезімтал аймақтар болып табылады.

Потенциалдық қауіптің жоғарылауы: Көлдегі су көлемінің азаюы ауыр металдардың және радионуклидтердің су-тұнба жүйесіндегі тепе-теңдігін бұзады. Су деңгейінің төмендеуі кезінде маргиналды ластанған аймақтардың (олардың 60 %-дан астамы уақытша сипатқа ие) ашылуы және олардың жел эрозиясына ұшырауы арқылы ластанудың қайталама таралу қаупі туындайды. Су көлемі азайған сайын су-шөгінді жүйесіндегі тритийдің (^3H) концентрациялық динамикасы артып, экологиялық тәуекелдерді одан әрі күшейтеді.

4.3. Геоақпараттық мониторингтің болашақ бағыттары

Шаған көлі сияқты техногендік генезисі бар су нысандары үшін ұзақ мерзімді геоақпараттық мониторинг ерекше маңызға ие. Қазіргі уақытта қашықтықтан зондау технологиялары мен бұлттық есептеу платформалары табиғи және антропогендік процестердің динамикасын жүйелі түрде бақылауға мүмкіндік береді. Google Earth Engine платформасының басты артықшылығы - көпжылдық спутниктік деректер архивіне жылдам қол жеткізу және үлкен көлемдегі деректерді автоматты түрде өңдеу мүмкіндігі. Бұл тәсіл аймақтық және жаһандық деңгейдегі гидрологиялық өзгерістерді салыстырмалы түрде талдауға мүмкіндік береді. Соңғы жылдары жасанды интеллект және машиналық оқыту алгоритмдері су айдындарын анықтау және олардың динамикасын талдау саласында кеңінен қолданылуда. Мысалы, Random Forest, Support Vector Machine және нейрондық желілер сияқты классификация әдістері спектралдық индекстермен бірге қолданылғанда су мен құрлық арасындағы шекараны дәлірек анықтауға мүмкіндік береді. Мұндай әдістер NDWI немесе MNDWI сияқты дәстүрлі индекстердің нәтижелерін толықтырып, суреттердегі спектралдық шудың әсерін азайтады. Болашақта Шаған көлі сияқты күрделі гидрогеологиялық нысандарды зерттеуде гибриді алгоритмдерді қолдану ғылыми нәтижелердің дәлдігін арттыра алады. Сонымен қатар көпспектрлі және гиперспектрлі спутниктік деректердің дамуы су сапасын бағалаудың жаңа мүмкіндіктерін ашуда. Гиперспектрлі сенсорлар судың химиялық құрамындағы өзгерістерді, балдырлардың көбеюін, минералдану деңгейін және ауыр металдардың ықтимал таралуын жанама түрде бағалауға мүмкіндік береді.

Бұл әдістер радионуклидтермен ластанған су жүйелерін зерттеу үшін ерекше маңызды, өйткені мұндай жағдайларда дәстүрлі гидрохимиялық өлшеулермен қатар кеңістіктік деректерді біріктіру қажет. Шаған көлінің жағдайында тұрақты мониторинг жүргізу тек гидрологиялық өзгерістерді бақылау үшін ғана емес, сонымен қатар радиациялық қауіпсіздік тұрғысынан да маңызды. Су деңгейінің төмендеуі кезінде бұрын су астында жатқан жағалау аймақтары ашылып, жел эрозиясының әсеріне ұшырауы мүмкін. Бұл құбылыс радионуклидтердің қайта таралуының әлеуетті көзіне айналуы ықтимал. Сондықтан геоақпараттық талдау нәтижелерін радиологиялық мониторинг деректерімен біріктіру аймақтың экологиялық қауіпсіздігін бағалаудың маңызды элементі болып табылады. Болашақ

зерттеулерде спутниктік деректерді климаттық модельдермен біріктіру маңызды бағыттардың бірі болмақ. Мысалы, жауын-шашын, температура және булану сияқты климаттық айнымалыларды гидрологиялық модельдермен біріктіре отырып, көлдің болашақтағы динамикасын болжауға болады. Мұндай сценарийлік модельдеу су ресурстарын басқару стратегияларын әзірлеуге және экожүйелік тәуекелдерді алдын ала бағалауға мүмкіндік береді. Осылайша, геоақпараттық технологиялар тек бақылау құралы ғана емес, сонымен қатар экологиялық жоспарлау мен басқарудың ғылыми негізі ретінде қарастырылуы тиіс.

5. Қорытынды

Жүргізілген ғарыштық және геоақпараттық зерттеу (1995–2025 жж.) Шаған көлінің гидроэкологиялық жүйесінің күрделі әрі тұрақсыз динамикаға ұшырағанын дәлелдеді. Алынған нәтижелер негізінде келесідей негізгі ғылыми тұжырымдар жасалды:

Морфометриялық және кеңістіктік динамика: NDWI және Overlay талдаулары көрсеткендей, Шаған көлінің су беті ауданы отыз жыл ішінде 17,3 %-ға (1,82 км²-ден 1,50 км²-ге дейін) қысқарған. Overlay талдауы су айдынының ең үлкен өзгерістері (70 % дейін) таяз, перифериялық маргиналды аймақтарда орын алғанын, ал кратердің терең орталық бөлігі («гидрологиялық өзегі») салыстырмалы түрде тұрақты болып қалғанын анықтады.

Климаттық және гидрологиялық детерминанттар: Су көлемінің азаюының негізгі себебі - климаттық жылыну. Трансэвапорацияның күшеюі мен жауын-шашын мөлшерінің азаюы көлдің су балансындағы тапшылықты арттырды.

Техногендік және радиоэкологиялық қауіптер: Су деңгейінің төмендеуі маргиналды ластанған аймақтарды ашып, радионуклидтердің жел эрозиясы арқылы қайталама таралу қаупін арттырады.

Болашақ геоақпараттық мониторинг: Алдағы уақытта зерттеудің әдістемелік базасын кеңейту мақсатында Random Forest және нейрондық желілер сияқты машиналық оқыту (ЖИ) алгоритмдерін қолдану жоспарлануда. Бұл әдістер радионуклидтермен ластанған су жүйелерін кешенді зерттеуде және экологиялық тәуекелдерді болжауда жоғары дәлдікті қамтамасыз етеді.

6. Қосымша материалдар: Қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер:

Концептуализация – Ш.Ш.; әдістеме – Ш.Ш.; бағдарламалық қамтамасыз ету – Ш.Ш.; зерттеу – Ш.Ш., М.М.; ресурстар – Ш.Ш., М.М.; әдістемені әзірлеу, зерттеу материалдарымен қамтамасыз ету, жетекшілік – М.М.; мәтінді дайындау, өңдеу және талдау жүргізу – Ш.Ш.

8. Авторлар туралы ақпарат

Мұсабаева, Меруерт - г.ғ.д, доцент, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; mussabayeva_mn@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4318-9950>

Шахарбек, Шалқар - магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010000; shalkar.shex111@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-5472-7389>

9. Қаржыландыру: Сыртқы қаржыландыру болған жоқ.

10. Алғыстар: Авторлар ғарыштық деректерді ашық қолжетімді түрде ұсынған USGS және Copernicus бағдарламаларына алғыс білдіреді. Сонымен қатар зерттеу барысында консультациялық қолдау көрсеткен кафедра ұжымына ризашылықтарын білдіреді.

11. Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Aktayev, M., Subbotin, S., Aidarkhanov, A., Aidarkhanova, A., Timonova, L., & Larionova, N. (2024). Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritium-contaminated groundwater at the Semipalatinsk test site. *PLoS ONE*, 19(3), e0300971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971>
2. Bai, J., Chen, X., Li, L., & Zhang, W. (2025). Research on the method of extracting water body information in Central Asia based on Google Earth Engine. *Water*, 17(6), 804. <https://doi.org/10.3390/w17060804>
3. Bauer, S., Gusev, B. I., Pivina, L. M., Apsalikov, K. N., & Grosche, B. (2005). Radiation exposure due to local fallout from Soviet atmospheric nuclear weapons testing in Kazakhstan: Solid cancer mortality in the Semipalatinsk historical cohort, 1960-1999. *Radiation Research*, 164(4 Pt 1), 409-419. <https://doi.org/10.1667/rr3423.1>
4. Carlsson, T., Ramebäck, H., & Skållberg, M. (2001). Plutonium and strontium isotopes in soil from the Semipalatinsk nuclear test site. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53(1), 45-56. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(00\)00115-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00115-4)
5. Chen, Y., Li, W., Deng, H., Fang, G., & Li, Z. (2016). Changes in Central Asia's water tower: past, present and future. *Scientific Reports*, 6, 35458. <https://doi.org/10.1038/srep35458>
6. Endo, S., Hoshi, M., & Ivanova, V. (2008). Iodine-129 measurements in soil samples from Dolon village near the Semipalatinsk nuclear test site. *Radiation and Environmental Biophysics*, 47, 359-365. <https://doi.org/10.1007/s00411-008-0162-3>
7. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
8. Hoshi, M., Shibata, Y., & Takada, J. (2006). Plutonium and uranium in human bones from areas surrounding the Semipalatinsk Nuclear Test Site. *Journal of Radiation Research*, 47(Suppl A), A85-A89. <https://doi.org/10.1269/jrr.47.A85>
9. IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
10. Kadirova, G., Shabdarbayeva, D., Chaizhunussova, N., & Massabayeva, M. (2025). Long-term exposure to ionizing radiation from the Semipalatinsk Nuclear Test Site and risk of cardiovascular mortality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(12), 1781. <https://doi.org/10.3390/ijerph22121781>
11. Kadyrzhanov, K. K., Lukashenko, S. N., & Kislitsin, S. B. (2005). Plutonium at the Semipalatinsk Nuclear Test Site (SNTS). *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 263(1), 229-234. <https://doi.org/10.1007/s10967-005-0041-1>
12. Larionova, N., Timonova, L., Toporova, A., Krivitskiy, P., Polevik, V., & Aidarkhanova, A. (2026). Tritium in vegetation at various types of radioactive contamination sites under arid climate conditions. *PLoS ONE*, 21(1), e0339645. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0339645>
13. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
14. Minkenova, K., Serik, A., & Panitskiy, A. (2025). Cytogenetic changes in *Rosa spinosissima* L. and *Leymus angustus* (Trin.) Pilg. growing under radioactive contamination conditions at the Semipalatinsk Nuclear Test Site. *PLoS ONE*, 20(5), e0324860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324860>
15. Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62-66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
16. Panitskiy, A., et al. (2023). Vertical distribution of radionuclides in soil at the Semipalatinsk Test Site beyond its test locations. *PLoS ONE*, 18(1), e0278581. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278581>

17. Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
18. Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal Landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4173-4189. <https://doi.org/10.3390/rs6054173>
19. Sairike, A., et al. (2026). Ecological monitoring of nuclear test sites over 20 years based on Remote Sensing Ecological Index. *Sustainability*, 18(1), 206. <https://doi.org/10.3390/su18010206>
20. Simon, S. L., Baverstock, K. F., & Lindholm, C. (2003). A summary of evidence on radiation exposures received near to the Semipalatinsk Nuclear Weapons Test Site in Kazakhstan. *Health Physics*, 84(6), 718-725. <https://doi.org/10.1097/00004032-200306000-00002>
21. Toktaganov, T., Mamyrbayeva, A., Aidarkhanov, A., Aidarkhanova, A., & Raimkanova, A. (2025). Tritium contamination and hydrological transport in the Shagan River: an isotope hydrology study. *PLoS ONE*, 20(10), e0333260. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0333260>
22. Wang, Z., et al. (2020). Effects of irrigation discharge on salinity of a large freshwater lake: a case study in Chagan Lake, Northeast China. *Water*, 12(8), 2112. <https://doi.org/10.3390/w12082112>
23. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
24. Yapiyev, V., Sagintayev, Z., Inglezakis, V. J., Samarkhanov, K., & Micklin, P. (2017). Essentials of endorheic basins and lakes: A review in the context of current and future water resource management and mitigation activities in Central Asia. *Water*, 9(10), 798. <https://doi.org/10.3390/w9100798>
25. Yessimkhanova, K., et al. (2026). Spatial and temporal analysis of climatic zones in Kazakhstan using Google Earth Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 15(2), 57. <https://doi.org/10.3390/ijgi15020057>

Study of the hydroecological dynamics of Lake Chagan over the last 30 years using remote sensing and gis methods

Meruyert Musabayeva, Shalkhar Shakharbek

Abstract: This research article is dedicated to the analysis of the spatio-temporal dynamics of Lake Chagan. The primary scientific goal is the quantitative assessment of the spatial changes in the water surface area over the period 1995–2025 and the identification of the climatic determinants, as well as the anthropogenic stress factors linked to the lake's nuclear heritage, that influenced these changes. The research methodology involved processing Landsat 5, 8 and Sentinel-2 satellite data on the Google Earth Engine (GEE) platform to calculate the Normalized Difference Water Index (NDWI). Comparative analysis was carried out using the Union Overlay geospatial analysis tool in the ArcGIS Pro environment. The main results of the study reveal that the lake's water surface area decreased by 17.3 % (from 1.82 km² to 1.50 km²) over three decades. This shrinkage is directly linked to regional climatic warming (with an average warming trend in Kazakhstan of 0.31 C per decade) and increased trans-evaporation. The scientific value of the work lies in demonstrating the ecosystem instability of this unique hydrogeological feature within the Semipalatinsk Test Site and contributing to the assessment of its ecological safety in the context of radionuclide (tritium, plutonium) contamination. The practical value of the results provides a crucial scientific and methodological basis for developing sustainable water resource management strategies.

Keywords: Chagan Lake; NDWI; ArcGIS; climate change; water balance; geospatial analysis; nuclear heritage.

Исследование гидроэкологической динамики озера Чаган за последние 30 лет с использованием космических и геоинформационных методов

Меруерт Мусабаева, Шалкар Шахарбек

Аннотация: Данная исследовательская статья посвящена анализу пространственно-временной динамики озера Шагана. Основной научной целью является количественная оценка пространственных изменений площади водной поверхности за период 1995–2025 гг. и выявление климатических детерминант, а также антропогенных стресс-факторов, связанных с ядерным наследием озера, которые оказали влияние на эти изменения. Методология исследования включала обработку спутниковых данных Landsat 5, 8 и Sentinel-2 на облачной платформе GoogleEarthEngine (GEE) с расчетом индекса NormalizedDifferenceWaterIndex (NDWI). Сравнительный анализ результатов был проведен с использованием инструмента пространственного анализа UnionOverlay в геоинформационной системе ArcGISPro. Основные результаты работы показывают, что площадь водной поверхности озера сократилась на 17,3 % (с 1,82 км² до 1,50 км²) за тридцатилетний период. Это сокращение напрямую связано с региональным потеплением климата (со средним трендом потепления в Казахстане 0.31°C за десятилетие) и увеличением трансэвапорации. Научная значимость работы заключается в доказательстве экосистемной нестабильности этого уникального гидрогеологического объекта на территории Семипалатинского полигона и внесении вклада в оценку его экологической безопасности в условиях загрязнения радионуклидами (третий, плутоний). Практическая ценность результатов служит важной научно-методологической основой для разработки стратегий устойчивого управления водными ресурсами.

Ключевые слова: озеро Шагана; NDWI; ArcGIS; изменение климата; водный баланс; геопропространственный анализ; ядерное наследие.