



IQLIM O'ZGARISHI SHAROITIDA QIZILQUM CHO'LI EKOTIZIMI DINAMIKASINI MODELLASHTIRISHNING ILMIY-METODIK ASOSLARI

Sherzod Tojiyev

Markaziy Osiyo atrof-muhit va iqlim o'zgarishini o'rganish universiteti (GREEN UNIVERSITY) huzuridagi Atrof-muhit va tabiatni muhofaza qilish texnologiyalari ilmiy-tadqiqot instituti tayanch doktoranti

Email: sherzod09141998@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1627-6235>

Annotatsiya: Ushbu maqolada global iqlim o'zgarishi va ortib borayotgan antropogen yuklama sharoitida Qizilqum cho'li ekotizimida kechayotgan ekologik transformatsiyalar va degradatsiya jarayonlarini baholashning ilmiy-metodologik asoslari tizimlashtirilgan. Tadqiqot doirasida sohadagi nufuzli xalqaro ilmiy manbalar sintez qilinib, cho'l ekotizimi dinamikasini baholash uchun ko'p faktorli Integral degradatsiya xavfi modeli (IDRM) konseptual arxitekturasini ishlab chiqilgan. Ekotizim parametrlarini baholashda nafaqat an'anaviy vegetatsiya indekslaridan (NDVI, SAVI), balki yer yuzasining termik rejimi (LST), tuproq-biofizik xususiyatlari (BSI), namlik stressi (NDMI) hamda gidroklimatik anomalialar (Precipitation, PET, Aridity Index) ko'rsatkichlarining sinergik ta'siri asoslab berilgan. Tabiiy va inson omillarining ulushini miqdoriy differensiyalashda RESTREND algoritmi hamda GeoDetector modelining interpretatsion imkoniyatlari ochib berilgan. Taklif etilayotgan model 2000–2025-yillardagi retrospektiv dinamikani tahlil qilish hamda CMIP6 (SSP2-4.5 va SSP5-8.5) ssenariylari asosida 2030–2050-yillarga mo'ljallangan istiqbolli geoprognostik xaritalarni yaratish imkonini beradi. Natijalar mintaqada yaylovlarni barqaror boshqarish va ekologik monitoring tizimini (GEOMS) yo'lga qo'yishda fundamental asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: Qizilqum cho'li, ekotizim dinamikasi, masofadan zondlash, GAT, RESTREND, GeoDetector, iqlim ssenariylari, yer degradatsiyasi, LST, integral modelashtirish.

Аннотация: В данной статье систематизированы научно-методологические основы оценки экологических трансформаций и процессов деградации, происходящих в экосистеме пустыни Кызылкум в условиях глобального изменения климата и возрастающей антропогенной нагрузки. В рамках исследования проведен синтез авторитетных международных научных источников и разработана концептуальная архитектура многофакторной Интегральной модели риска деградации (IDRM). Обосновано, что для точной оценки параметров экосистемы необходимо использовать не только традиционные вегетационные индексы (NDVI, SAVI), но и синергетическое воздействие термического режима земной поверхности (LST), почвенно-биофизических свойств (BSI), влажностного стресса (NDMI) и



гидроклиматических аномалий (Precipitation, PET, Aridity Index). Раскрыты интерпретационные возможности алгоритма RESTREND и модели GeoDetector в количественной дифференциации вклада природных и антропогенных драйверов. Предложенная модель позволяет анализировать ретроспективную динамику за 2000–2025 гг. и формировать перспективные геопрогностические карты на 2030–2050 гг. на основе сценариев CMIP6 (SSP2-4.5 и SSP5-8.5). Результаты исследования служат фундаментальной основой для устойчивого управления пастбищами и внедрения системы экологического мониторинга (GEOMS) в регионе.

Ключевые слова: пустыня Кызылкум, динамика экосистем, дистанционное зондирование, ГИС, RESTREND, GeoDetector, сценарии климата, деградация земель, LST, интегральное моделирование.

Abstract. This paper systematizes the scientific and methodological foundations for assessing ecological transformations and degradation processes in the Kyzylkum Desert ecosystem under the combined pressures of global climate change and increasing anthropogenic workloads. Based on a comprehensive synthesis of high-impact international literature, a conceptual architecture for a multi-factor Integral Degradation Risk Model (IDRM) was developed. The study demonstrates that an accurate ecosystem assessment requires shifting beyond traditional vegetation indices (NDVI, SAVI) to incorporate the synergetic effects of land surface temperature (LST), bare soil characteristics (BSI), moisture stress (NDMI), and hydroclimatic anomalies (Precipitation, PET, Aridity Index). Furthermore, the interpretative capabilities of the RESTREND algorithm and the GeoDetector model are highlighted for quantitatively decoupling the driving forces of climate variability and human activities. The proposed model enables both a retrospective analysis of ecosystem dynamics for the 2000–2025 baseline period and the generation of future geoprognostic risk maps for 2030–2050 using CMIP6 climate scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). These findings provide a robust framework for sustainable rangeland management and the implementation of a comprehensive geoeological monitoring system (GEOMS) in the region..

Keywords: Kyzylkum Desert, ecosystem dynamics, remote sensing, GIS, RESTREND, GeoDetector, climate scenarios, land degradation, LST, integral modeling.

KIRISH

Cho'l ekotizimlari Yer landshaft qobig'ining eng dinamik va nozik tizimlaridan biri bo'lib, ularning barqarorligi bevosita namlik rejimi va energetik balans qonuniyatlariga bog'liqdir. Bunday hududlar uchun o'simlik qoplaminig siyrakligi, atmosfera yog'inlari miqdorining kamligi, potensial bug'lanishning yuqoriligi, tuproq namligining cheklanganligi hamda biologik mahsuldorlikning mavsumiy va yillik tebranishlarga o'ta sezuvchanligi xosdir. Shu sababli, global iqlim o'zgarishi sharoitida cho'l ekotizimlarida kuzatilayotgan transformatsiya jarayonlarini faqat alohida



indikatorlar vositasida emas, balki iqlim, tuproq-edafik, vegetatsion va antropogen omillarni integratsiyalovchi kompleks modellashtirish asosida baholash dolzarb vazifa hisoblanadi.

Qizilqum cho'li O'zbekistonning eng yirik arid landshaft majmualaridan biri bo'lib, uning geoekologik holati Markaziy Osiyo qurg'oqchil hududlariga xos umumiy qonuniyatlar bilan bir qatorda, o'ziga xos regional xususiyatlarga ham ega. Hududda havo haroratining ko'tarilishi, yog'inlar rejimining notekisligi, transpiratsiya jarayonlarining jadallashishi, shuningdek, yaylovlardan noto'g'ri foydalanish, tog'-kon sanoati va infratuzilma obyektlarining kengayishi vegetatsiya qoplami, tuproq namligi va yer yuzasi harorati dinamikasiga jiddiy ta'sir ko'rsatmoqda. Shu sabali, Qizilqum cho'li ekotizimlari dinamikasini modellashtirish - iqlim o'zgarishiga moslashish chora-tadbirlarini ishlab chiqish, cho'llanish xavfini oldindan prognoz qilish va ekologik qaltis (xavfli) zonalarini aniqlashda muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi.

So'nggi yillarda cho'l va qurg'oqchil hududlar dinamikasini o'rganishda masofadan zondlash, geoaxborot tizimlari (GAT), *Google Earth Engine* (GEE) platformasi, ko'p yillik vegetatsiya indeksleri (NDVI), yer yuzasi harorati (LST), tuproq namligi indeksi (NDMI), tuproq bareal indeksi (BSI), shuningdek, yog'in-sochin va potensial evapotranspiratsiya (PET) ma'lumotlari bazasi keng qo'llanilmoqda. Bundan tashqari, uzoq muddatli ekologik o'zgarishlarni aniqlash va ularning asosiy yetakchi omillarini ajratish hamda kelajakdagi xavf ssenariylarini prognoz qilishda Mann-Kendall (Mann-Kendall) trend testi, Sen qiyaligi (Sen's slope), RESTREND, Geodetector va mashinaviy o'qitish (*machine learning*) algoritmlari yuqori samaradorlik ko'rsatmoqda [1-4].

Ushbu maqolaning maqsadi - iqlim o'zgarishi sharoitida Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini modellashtirish uchun zarur bo'lgan ilmiy-metodik yondashuvlarni tizimlashtirish, ustuvor indikatorlar majmuini aniqlash va integral degradatsiya xavfi modelining konseptual tuzilmasini ishlab chiqishdan iborat.



1-rasm. Qizilqum cho'li ekotizimiga ta'sir qiluvchi omillarning konseptual sxemasi.
Materiallar va metodlar.



Maqolada Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini modellashtirishning metodologik asoslarini shakllantirish maqsadida sohadagi 10 ta nufuzli xalqaro ilmiy manba tizimli tahlil qilindi. Ushbu adabiyotlar tahlil uchun tanlab olinishida quyidagi **uchta fundamental mezon** asos qilib olindi: birinchidan, geografik va hududiy muvofiqlik, yani tadqiqotlarning bevosita Markaziy Osiyo, Orol dengizi havzasi, O'zbekiston hududlari yoki global arid (qurg'oqchil) mintaqalarga tegishliligi; ikkinchidan, tadqiqot jarayonlarida zamonaviy masofadan zondlash (RS) va geografik axborot tizimlari (GAT) metodlaridan kompleks foydalanilganligi; uchinchidan, ilmiy nashrlarning xalqaro ma'lumotlar bazalaridagi (Scopus, Web of Science) reytingi, impakt-faktori, iqtiboslik darajasi hamda taqdim etilgan metodikaning fundamental ahamiyati.

Tahlil qilingan ilmiy manbalar qatoridan *Science of the Total Environment, Journal of Arid Environments, Frontiers in Earth Science, Remote Sensing, Land, Atmosphere, Nature Communications* va *Nature Climate Change* kabi yuqori impakt-faktorli jurnallarda chop etilgan fundamental maqolalar o'rin olgan. Ushbu adabiyotlarning konseptual mazmuni Qizilqum cho'li ekotizimini baholashda uchta asosiy strategik yo'nalishni ajratib ko'rsatish imkonini berdi: 1) global qurg'oqchil hududlar nazariyasi, 2) Markaziy Osiyo va Orol havzasi bo'yicha hududiy tajriba va 3) masofadan zondlash ma'lumotlariga asoslangan amaliy modellashtirish usullari.

Metodik jihatdan tadqiqotda tizimli yondashuv, qiyosiy-tahliliy baholash, indikatorlarni tizimlashtirish, model bloklarini differensiyalash hamda Qizilqumning o'ziga xos tabiiy-geografik sharoitiga moslashtirilgan integral modellashtirish usullaridan foydalanildi. Bunda, ekotizim dinamikasini integral baholash modeli uchun tanlangan geoekologik indikatorlar quyidagi funksional vazifalari bo'yicha talqin qilindi va tizimlashtirildi: NDVI - vegetatsiya qoplamining mavsumiy va yillik faolligi indikator; NDMI - o'simlik va tuproq qatlamining namlik stressi darajasi; LST - yer yuzasining termik rejimi va issiqlik balansi ko'rsatkichi; BSI - tuproq qatlamining ochilib qolishi (yalang'ochlanishi) va degradatsiya darajasi; Yog'in-sochin va PET - hududning gidrotermik sharoiti va dinamikasi; Aridlik indeksi - mintaqaviy qurg'oqchilik va iqlimiy keskinlik darajasi; Antropogen qatlamlar - ekotizimga bo'ladigan inson omili va sanoat bosimi indikator (1-jadval).

1-jadval. Tahlil qilingan asosiy xalqaro ilmiy manbalar va ularning Qizilqum ekotizimini modellashtirishdagi metodologik ahamiyati

No	Mualliflar va yil	Tadqiqot hududi	Asosiy metodlar	Qizilqum cho'li ekotizimini baholashdagi ilmiy ahamiyati
1	Jiang et al., 2017	Markaziy Osiyo	NDVI dinamikasi, chiziqli regressiya tahlili, Hurst eksponenti	Vegetatsiya qoplami, iqlimiy o'zgaruvchanlik va antropogen omillar o'rtasidagi korrelyativ bog'liqlikni baholash.



2	Rivera-Marin et al., 2022	Global (Arid mintaqalar)	Tizimli tahlil (Review), masofadan zondlash (RS) algoritmlari	Cho'llanish va landshaftlar degradatsiyasini masofaviy monitoring qilishning fundamental va uslubiy asoslar
3	Berdimbetov et al., 2021	Orol dengizi havzasi	NDVI, RESTREND	Ekotizimlar degradatsiyasini harakatga keltiruvchi tabiiy va antropogen omillarni o'zaro ajratish.
4	Xing et al., 2022	Markaziy Osiyo	Theil-Sen medians ko'rsatkichi, Mann-Kendall trend testi	Mintaqaviy gidrotermik sharoitning o'zgarishi va uning vegetatsiya qoplami trendlariga ta'sirini statistik tahlil qilish
5	Rakhmatova et al., 2024	O'zbekiston	RCP/SSP ssenariylari, qurg'oqchilik indeksleri (SPI/SPEI)	Kelajakdagi iqlimiy xavf-xatarlar va ekstremal qurg'oqchilik ssenariylarini hududiy miqyosda modellashtirish
6	Gao et al., 2023	Markaziy Osiyo	NDVI, Geofazoviy tahlil, GeoDetector modeli	Vegetatsiya qoplami dinamikasiga ta'sir etuvchi tabiiy-geografik va ijtimoiy-iqtisodiy omillarning ulushini aniqlash.
7	Burrell et al., 2020	Global arid hududlar	Climate attribution (iqlimiy atributsiya) usullari	Global iqlim o'zgarishi va desertifikatsiya (cho'llanish) jarayonlarining o'zaro aloqadorlik qonuniyatlarini tahlil qilish.
8	Huang et al., 2016	Global arid hududlar	CMIP5 iqlim modellari, RCP ssenariylari	Qurg'oqchil va o'ta qurg'oqchil (arid/giperarid) landshaftlar kengayishining global va mintaqaviy prognozlarini
9	Wang et al., 2022	Global arid hududlar	Kompleks adabiyotlar tahlili (Review)	Arid ekotizimlar mahsuldorligi (Dryland productivity) va bashoratlashdagi noaniqliklarni kamaytirish prinsiplari.
10	Formica et al.,	Markaziy Osiyo	MODIS NDVI, rainfall-vegetation	Sun'iy yo'ldoshdan olingan NDVI ko'rsatkichlarini



	2017		dinamikasi	atmosfera yog'inlari va yer usti ma'lumotlari bilan validatsiya qilish.
--	------	--	------------	---



2-rasm. Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini modellashtirishning integral metodologik sxemasi

Taqdim etilgan integral model Qizilqum cho'li ekotizimida kechayotgan ekologik transformatsiyalar va degradatsiya jarayonlarini baholash uchun **uchta asosiy bosqichni (blokni)** o'z ichiga oladi:

1. Ma'lumotlarni to'plash va dastlabki ishlov berish bloki (Input Data): Ushbu bosqichda sun'iy yo'ldosh platformalari (MODIS, Landsat, Sentinel) hamda iqlimiy ma'lumotlar bazalaridan (CHIRPS, ERA5) olingan ko'p yillik ko'rsatkichlar (NDVI, NDMI, LST, BSI, yog'in-sochin va PET) Google Earth Engine (GEE) platformasi yordamida fazoviy-vaqtinchalik unifikatsiya qilinadi.

2. Statistik va fazoviy tahlil bloki (Data Processing & Trends): Mazkur blokda ekotizim parametrlari tendensiyalarini aniqlash maqsadida Theil-Sen va Mann-Kendall trend testlari qo'llaniladi. Shu bilan birga, iqlimiy va antropogen ko'rsatkichlarning ekotizimga ta'sir ulushini miqdoriy ajratish uchun RESTREND tahlili hamda GeoDetector (geografik detektor) matematik-statistika usullaridan foydalaniladi.

3. Integral degradatsiya xavfi va modellashtirish bloki (Output & Scenarios): Yakuniy bosqichda barcha indikatorlar Machine Learning algoritmlari asosida integrallashib, Qizilqum cho'li uchun Integral degradatsiya xavfi modeli (IDRM) shakllantiriladi. Bu model ekologik qaltis zonalarini hududlashtirish (zonallashtirish)



hamda kelajakdagi (RCP/SSP) iqlim ssenariylari asosida prognoz xaritalarini yaratish imkonini beradi.

Natijalar va muhokama.

Global qurg'oqchil hududlar tajribasi va konseptual asoslar.

Global ilmiy tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, qurg'oqchil hududlar iqlim o'zgarishiga eng sezgir ekotizimlar qatoriga kiradi. Xususan, Burrell va boshqalar [7] tomonidan antropogen iqlim o'zgarishlari dunyodagi arid hududlarning sezilarli qismida cho'llanish jarayonlarining boshlaganligi isbotlangan. Ushbu nazariy xulosa Qizilqum cho'li ekotizimi uchun ham fundamental ahamiyatga ega. Chunki mintaqada namlik balansining manfiy tomonga siljishi va issiqlik stressining ortishi tabiiy o'simlik qoplaminig siyraklashishiga bevosita sabab bo'lmoqda.

Huang va boshqalar [8] iqlim o'zgarishi fonida qurg'oqchil hududlar geografik chegaralarining global miqyosda kengayish tendensiyasini modellashtirgan. Ushbu qarash Qizilqum cho'li va unga tutash yarim cho'l landshaftlarida ekologik xavf zonalarining kengayishi ehtimolini baholashda muhimdir. O'z navbatida, Wang va boshqalar [9] qurg'oqchil hududlar mahsuldorligi (dryland productivity) faqatgina atmosfera yog'inlari miqdori bilan cheklanmasdan, balki tuproq namligi, faol evapotranspiratsiya, o'simliklar tarkibi, yerdan foydalanish xususiyati va antropogen bosim kabi ko'p komponentli omillarga bog'liqligini asoslagan. Bu esa Qizilqum ekotizimini baholashda faqatgina unifikatsiyalashgan NDVI indeksidan foydalanish yetarli emasligini, balki model tarkibiga LST, NDMI, PET va antropogen yuklama qatlamlarini kompleks integratsiya qilish zarurligini metodologik jihatdan isbotlaydi.

Markaziy Osiyo va Qizilqum sharoitida vegetatsiya dinamikasi tahlili.

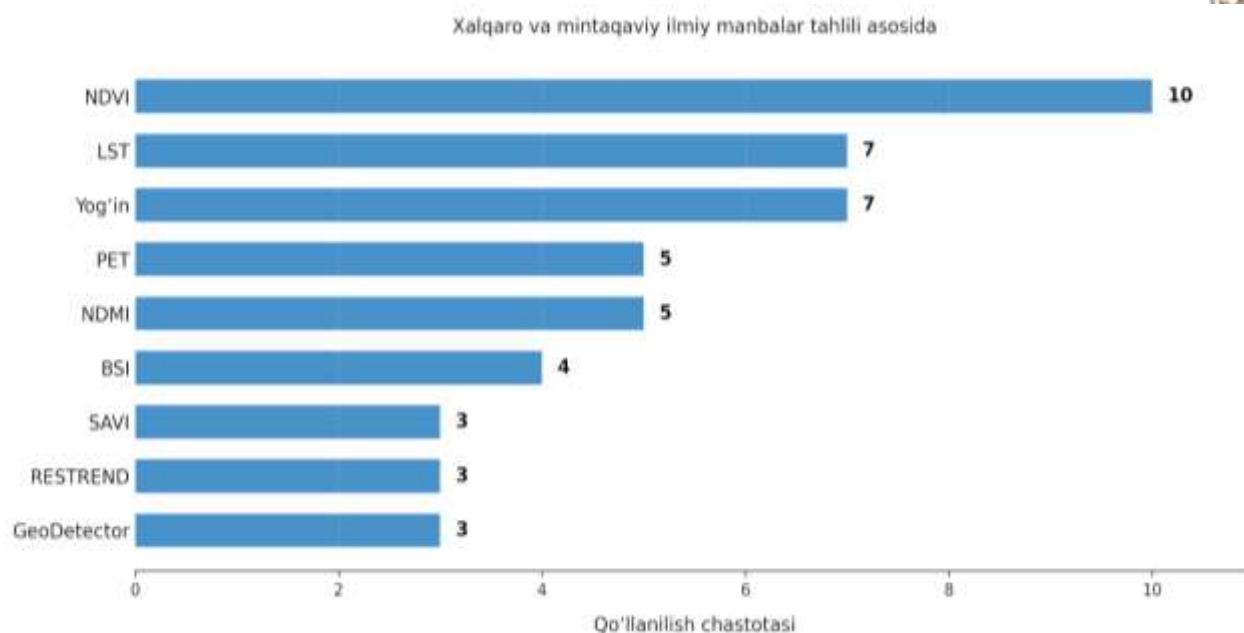
Markaziy Osiyo mintaqasi bo'yicha olingan tadqiqot natijalari Qizilqum cho'li ekotizimining o'zgarishi dinamikasini interpolatsiya qilishda asosiy ilmiy baza hisoblanadi. Jiang va boshqalar [1] NDVI ko'rsatkichlari asosida vegetatsiya dinamikasi, iqlimiy o'zgaruvchanlik va inson faoliyati o'rtasidagi munosabatlarni chiziqli modellashtirgan. Ushbu tadqiqotdan kelib chiqadigan muhim metodik xulosa shuki, cho'l va yarim cho'l hududlarida o'simlik qoplaminig o'zgarishi bir vaqtning o'zida ham iqlim, ham antropogen bosim bilan izohlanishi mumkin. Qizilqum sharoitida yaylovlardan tizimsiz va intensiv foydalanish, transport infratuzilmasining kengayishi, to'g'-kon sanoati va aholi punktlari atrofida lokal ekologik yuklamalar aynan shu kontekstda alohida tahlil qilinishni talab etadi.

Formica va boshqalar [10] tomonidan o'tkazilgan tadqiqotlar MODIS sun'iy yo'ldoshi ma'lumotlariga asoslangan NDVI indeksleri Markaziy Osiyoning arid va yarim-arid zonalarida yashil biomassa fazoviy-vaqtinchalik dinamikasini baholashda yuqori ishonchlilikka ega ekanligini ko'rsatdi. Qizilqum cho'lining o'ziga xos fitotsenologik tuzilishida efemer va efemeroid o'simliklar guruhi asosiy o'rin tutadi. Ular yog'in miqdori yuqori bo'lgan yillarda qisqa muddatli vegetatsion faollik ko'rsatadi, qurg'oqchil davrlarda esa biomassa ko'rsatkichlari keskin minimal darajaga tushadi. Shu sababli, ekotizim monitoringida NDVI indeksining yillik o'rtacha



qiymatlari bilan cheklanish tizimli xatoliklarga olib kelishi mumkin; tadqiqotda vegetatsiya davri, anomal yog'inli davrlar va fenologik faol fazalarini differensial tahlil qilish uslubiy jihatdan to'g'ri hisoblanadi.

Gao va boshqalar [6] tomonidan 2001–2020-yillar davomida Markaziy Osiyodagi vegetatsiya dinamikasini va unga ta'sir etuvchi omillar ulushini *GeoDetector* (geografik detektor) modeli yordamida baholash metodikasi ishlab chiqilgan. Ushbu matematik-statistik yondashuv Qizilqum cho'li ekotizimini modellashtirishda eng samarali vosita hisoblanadi. Chunki u atmosfera yog'inlari, harorat, tuproq namligi, yer yuzasi harorati (LST) yoki antropogen bosim kabi mustaqil o'zgaruvchilarning qay biri o'simlik qoplami degradatsiyasiga determinant ta'sir ko'rsatayotganini miqdoriy jihatdan (faza va ulushlarda) aniqlash imkonini beradi.



3-rasm. Tahlil qilingan ilmiy manbalarda geoeologik monitoring va modellashtirish uchun qo'llanilgan asosiy indikatorlarning ulushi.

Rasmda xalqaro va mintaqaviy ilmiy manbalar tahlili asosida arid ekotizimlar, xususan, Qizilqum hududi dinamikasini modellashtirishda eng ko'p qo'llanilgan indikatorlarning chastotaviy taqsimoti keltirilgan. Grafik natijalari shuni ko'rsatadiki, masofaviy zondlash va geoaxborot tizimlariga asoslangan tadqiqotlarda vegetatsiya, gidrotermik sharoit, namlik rejimi hamda degradatsiya jarayonlarini ifodalovchi ko'rsatkichlar ustuvor o'rin egallaydi.

Tahlil natijalariga ko'ra, NDVI indikatorini eng yuqori chastotaga ega bo'lib, 10 marta qayd etilgan. Bu holat NDVI indeksining arid va yarim arid hududlarda o'simlik qoplami holati, biomassaning nisbiy zichligi hamda vegetatsiya faolligini baholashda tayanch ko'rsatkich sifatida keng qo'llanilishini tasdiqlaydi. Ayniqsa, cho'l va cho'lga tutash landshaftlarda o'simlik qoplami siyrakligi hamda mavsumiy o'zgaruvchanligi sharoitida NDVI uzoq muddatli monitoring uchun muhim diagnostik indikator hisoblanadi.



LST va yog'in ko'rsatkichlari 7 martadan qayd etilgan bo'lib, ular arid ekotizimlarning gidrotermik sharoitini baholashda muhim ahamiyatga ega. Yer yuzasi harorati (LST) tuproq va o'simlik qoplami bilan bog'liq termik rejimni ifodalasa, yog'in miqdori hududning namlanish darajasi, qurg'oqchilik xavfi va vegetatsiya rivojlanishining tabiiy cheklovlarini aniqlash imkonini beradi. Shu sababli ushbu ikki indikator cho'l ekotizimlarida iqlimiy omillar ta'sirini baholashda asosiy ko'rsatkichlar qatoriga kiradi.

PET va NDMI indikatorlari 5 martadan uchragan. Potensial evapotranspiratsiya (PET) arid hududlarda atmosferaning namlikka bo'lgan talabini, bug'lanish jarayonlari intensivligini hamda suv tanqisligi xavfini baholashda qo'llaniladi. NDMI esa tuproq-o'simlik tizimidagi namlik holatini aniqlash, vegetatsiyaning suv stressiga sezgirligini baholash va qurg'oqchilik ta'sirini masofaviy zondlash asosida kuzatish imkonini beradi.

BSI indikatori 4 marta qayd etilgan bo'lib, ochiq tuproq yuzalari, degradatsiyalangan maydonlar va o'simlik qoplami siyraklashgan hududlarni aniqlashda muhim hisoblanadi. Arid ekotizimlarda tuproq yuzasining ochilishi, shamol eroziyasi, deflyatsiya va cho'llanish jarayonlari landshaft barqarorligining pasayishini ko'rsatgani sababli BSI degradatsiya xavfini baholashda amaliy ahamiyat kasb etadi.

SAVI, RESTREND va Geodetector ko'rsatkichlari 3 martadan qayd etilgan. SAVI siyrak o'simlik qoplami mavjud hududlarda tuproq fonining ta'sirini kamaytirgan holda vegetatsiya holatini aniqlashga xizmat qiladi. RESTREND usuli vegetatsiya dinamikasiga iqlim va inson omillari ta'sirini ajratib ko'rsatishda qo'llaniladi. Geodetector esa omillarning fazoviy tabaqalanishi va ularning ekotizim holatiga ta'sir darajasini aniqlashda muhim analitik yondashuv sifatida foydalaniladi.

Umuman olganda, grafik natijalari Qizilqum va boshqa arid ekotizimlar dinamikasini modellashtirishda vegetatsiya indeksleri, gidrotermik ko'rsatkichlar, namlik indikatorlari va degradatsiya belgilarini ifodalovchi parametrlar eng muhim metodik asos bo'lib xizmat qilishini ko'rsatadi. Mazkur indikatorlar kompleks qo'llanilganda cho'llanish, o'simlik qoplami degradatsiyasi, suv tanqisligi va landshaft zaifligi jarayonlarini fazoviy-vaqt kesimida baholash imkoniyati ortadi.

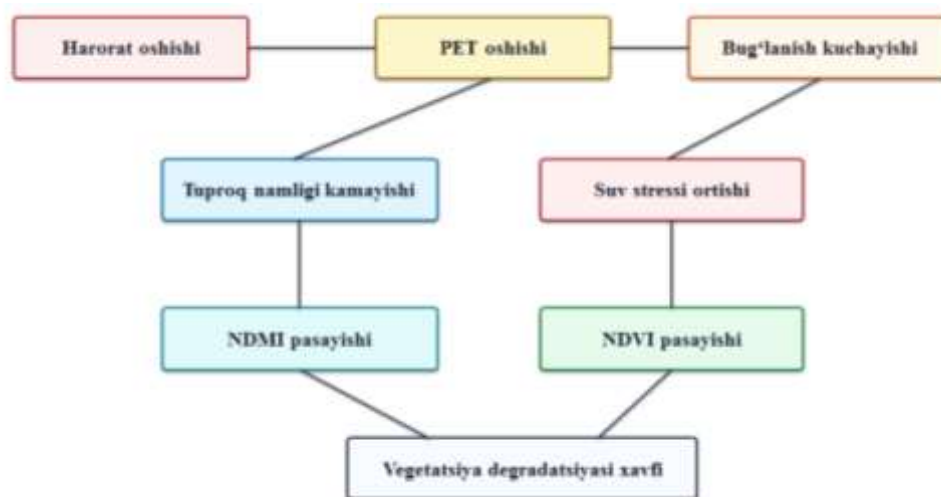
Gidrotexnik-termik rejim va qurg'oqchilik omillarining ekotizimga ta'siri.

Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini modellashtirishda gidrotermik sharoit va iqlimiy o'zgaruvchanlik parametrlari markaziy o'rin tutadi. Xing va boshqalar [4] tomonidan Markaziy Osiyo mintaqasida o'simlik qoplami holatining havo harorati, atmosfera yog'inlari, potensial evapotranspiratsiya (PET) hamda tuproq namligi ko'rsatkichlari bilan o'zaro korrelyatsiyasi chiziqli va qiyosiy modellar yordamida tahlil qilingan. Ushbu tadqiqot Qizilqum cho'li ekotizimlarini baholash uchun muhim metodologik baza hisoblanadi. Zero, mintaqada fitotsenozlar mahsuldorligining pasayishi ko'pincha faqatgina atmosfera yog'inlarining kamayishi (defitsiti) bilan emas, balki PET ko'rsatkichlarining anomal ortishi hamda tuproqning unumdor qatlamidagi samarali namlik zaxirasining keskin pasayishi bilan ham izohlanadi.



Mintaqaviy qurg'oqchilik jarayonlarini va uning kelajakdagi xavf-xatarlarini baholashda Rakhmatova va boshqalar [5] tomonidan O'zbekiston hududi uchun RCP va SSP xalqaro ssenariylari asosida amalga oshirilgan iqlimiy prognozlash tadqiqoti alohida metodologik qiymat kasb etadi. Mazkur manba Qizilqum cho'lida istiqboldagi qurg'oqchilik xavfini raqamli modellastirish uchun havo harorati hamda yog'in-sochin miqdorining regional ssenariy qatlamlarini tanlashda ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Ekotizim dinamikasining retrospektiv tahlili uchun 2000–2025-yillardagi tarixiy va empirik ma'lumotlar bazasi asos qilib olinsa, kelajakdagi ekologik xavflarni prognoz qilishda 2030, 2040 va 2050-yillar kesimida SSP2-4.5 (mo'tadil rivojlanish ssenariysi) hamda SSP5-8.5 (eng yuqori antropogen yuklama va issiqxona gazlari emissiyasi ssenariysi) kabi global iqlim ssenariylarining fazoviy qatlamlarini model tarkibiga integratsiya qilish uslubiy jihatdan eng maqbul yechim hisoblanadi.



4-rasm. Qizilqum cho'li ekotizimida gidrotermik sharoit (Precipitation, LST, PET) va vegetatsiya faolligi (NDVI) o'rtasidagi korrelyativ bog'liqlik modeli

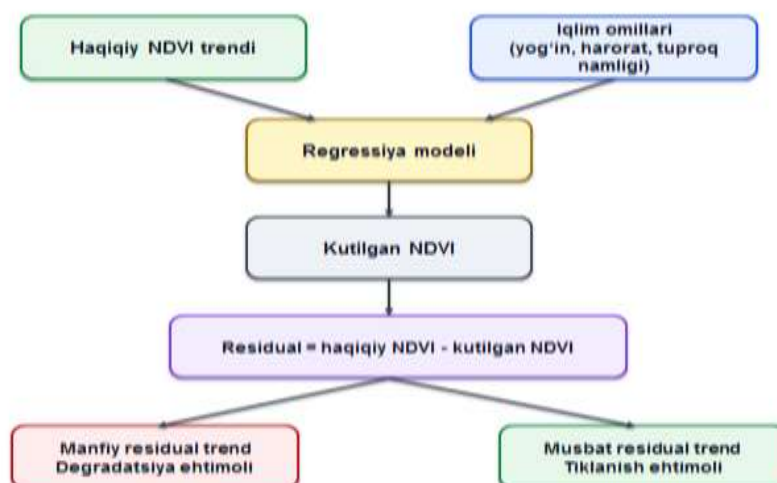
Yer degradatsiyasi va yetakchi (drayver) omillarni ajratish

Qizilqum cho'li ekotizimida kechayotgan ekologik degradatsiya jarayonlarini aniq baholash hamda ularni boshqarish uchun iqlimiy va antropogen ta'sir ko'rsatkichlarini o'zaro ajratish metodologik jihatdan ustuvor vazifa hisoblanadi. Berdimbetov va boshqalar [3] tomonidan Orol dengizi havzasi sharoitida 1982–2015-yillar davomida yerlar degradatsiyasi va uning yetakchi omillarini uzoq muddatli NDVI ko'rsatkichlari va RESTREND modeli yordamida identifikatsiyalangan. RESTREND yondashuvi tabiiy o'simlik qoplamidagi o'zgarishlarning aniq qaysi ulushi iqlimiy omillar (masalan, namlik taqchilligi) bilan tushuntirilishi hamda qaysi qismi iqlimiy bo'lmagan (antropogen va boshqa lokal) omillar bilan determinatsiyalanishini miqdoriy ajratish imkonini beradi.

Qizilqum cho'lining o'ziga xos geoekologik sharoitida RESTREND algoritmlarini qo'llash alohida ilmiy ahamiyatga ega. Chunki mintaqaning ayrim hududlarida yashil biomassa (NDVI) pasayishi tabiiy qurg'oqchilik sikllari bilan bog'liq bo'lsa, boshqa



hududlarda (ayniqsa, sanoat va chorvachilik zonalarida) bu jarayon yaylovlar yuklamasining ortishi, kon-metallurgiya sanoati, transport-infratuzilma tarmoqlarining kengayishi kabi antropogen buzilishlar bilan bog'liq. Agar sun'iy yo'ldosh ma'lumotlaridan olingan haqiqiy NDVI qiymatlari iqlimiy omillar asosida modellashtirilgan kutilayotgan NDVI qiymatidan doimiy ravishda past bo'lsa, ushbu holat modelda maqsadli antropogen degradatsiya yoki lokal texnogen buzilish indikatori sifatida talqin qilinadi.



5-rasm. RESTREND yondashuvi asosida iqlimiy va antropogen degradatsiya omillarini ajratish blok-sxemasi

Qizilqum cho'li ekotizimi uchun integral indikatorlar tizimi.

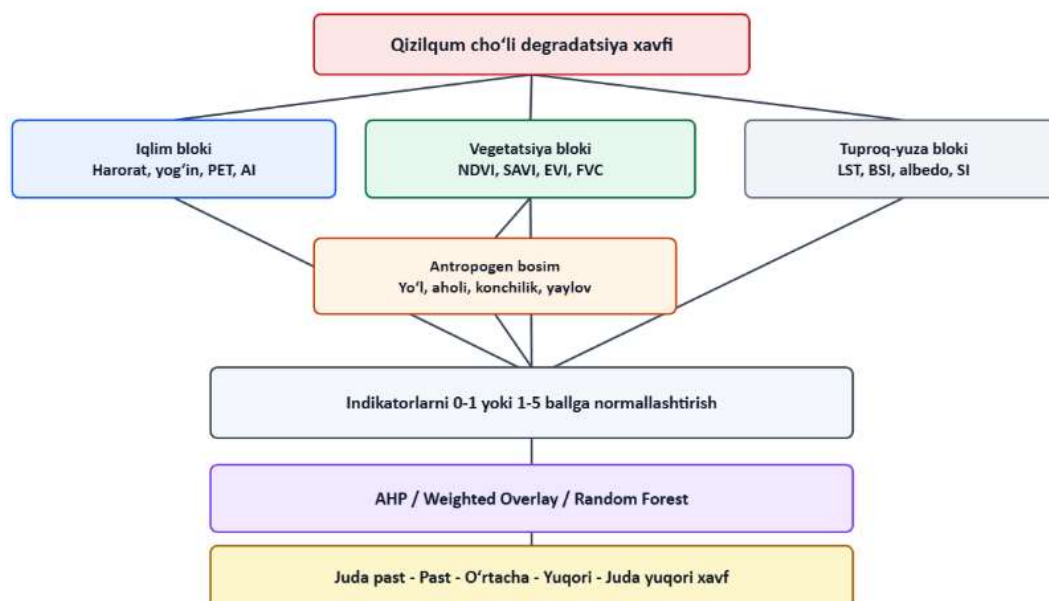
Tahlil qilingan fundamental ilmiy manbalar asosida Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini modellashtirishda geoeologik indikatorlar to'rtta konseptual blokka ajratilishi mumkin: iqlim bloki, vegetatsiya faolligi bloki, tuproq-yuza biofizik parametrlari bloki va antropogen ekologik yuklama bloki. Har bir blok o'ziga xos fazoviy ma'lumot qatlamlari bilan ifodalanadi. Ushbu ko'p komponentli ma'lumotlar bazasini yagona kartografik proyeksiya va koordinatalar tizimiga keltirish, fazoviy aniqlik darajasini unifikatsiyalash hamda ularni yagona balli-indeksli shkalaga o'tkazish Integral degradatsiya xavfi modelini (IDRM) shakllantirishning fundamental va majburiy shartidir.

2-jadval. Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini modellashtirish uchun tavsiya etiladigan integral geoeologik indikatorlar tizimi

Funksional blok	Bazaviy indikatorlar	Indikatorning geoeologik ma'nosi	Integral modeldagi funksional talqini va xavf mezon
Iqlim	Atmosfera yog'inlari	Hududning asosiy tabiiy namlik va gidrologik ta'minoti manbai	Yog'in miqdorining kamayishi va ekologik xavfning ortishi



Iqlim	PET (Potential Evapotranspiration) / Aridlik indeksi (AI)	Hududiy issiqlik muvozanati, suv yo'qotilishi va qurg'oqchilik darajasi	PET ning anomal ortishi yoki AI indeksining pasayishi - giperaridlik va yuqori xavf
Vegetatsiya	NDVI / SAVI	O'simlik qoplami zichligi va fotosintetik faolligi	Indekslar qiymatining pasayishi - fitotsenoz degradatsiyasi va vegetatsion stress
Namlik	NDMI	O'simlik va tuproq qatlamining joriy namlik ta'minoti	Salbiy va past qiymatlar -hududning gidrologik hamda namlik stressi holati
Tuproq -yuza	LST	Yer yuzasining termik rejimi, radiatsiyaviy va issiqlik balansi	LST ko'rsatkichlarining ekstremal ko'tarilishi - termik stress va cho'llanish indikatori
Tuproq -yuza	BSI / Sirt albedosi (Albedo)	Yuzasi ochilib qolgan tuproq qatlamlari ulushi va reflektivligi	BSI va albedo qiymatlarining ortishi - o'simlik qoplami kamayishi va faol degradatsiya belgisi
Antropogen yuklama	Transport yo'llari, konchilik maydonlari, aholi punktlari, yaylovlar yuklamasi	Ekotizimga inson faoliyati va sanoat ob'ektlari tomonidan bo'ladigan texnogen bosim	Antropogen qatlamlar radiusida bosimning ortishi - integral xavf darajasining keskinlashuvi



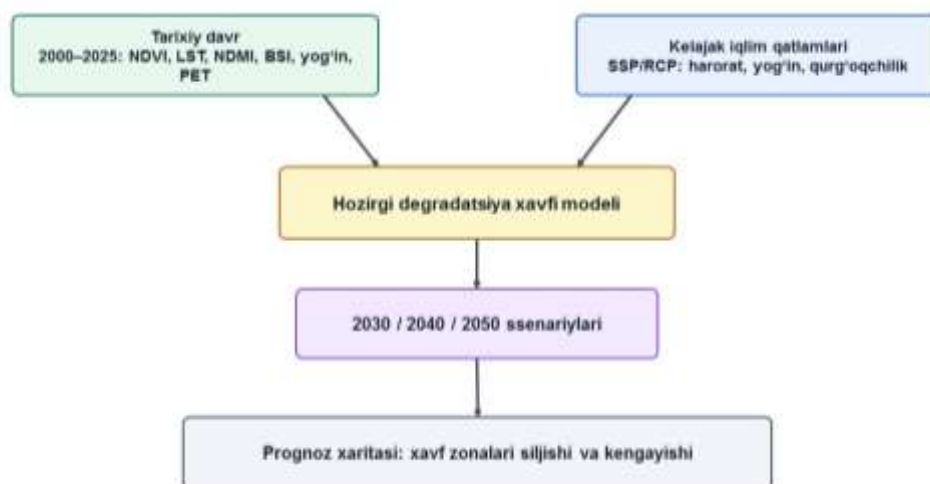
6-rasm. Qizilqum cho'li uchun Integral degradatsiya xavfi modelining (IDRM) ko'p mezonli fazoviy arxitekturasini va tuzilishi

Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini fazoviy prognozlash yondashuvlari.

Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini modellashtirishda tarixiy baholash va kelajakdagi geoprognostik ssenariylar integratsiyasi o'zaro komplementar (bir-birini to'ldiruvchi) zanjirni tashkil etishi lozim. Retrospektiv tahlil bosqichida 2000–2025-yillar uchun Landsat, MODIS, CHIRPS, ERA5 va TerraClimate global ma'lumotlar bazalaridan olingan empirik ko'rsatkichlar asosida NDVI, NDMI, LST, BSI, atmosfera yog'inlari va PET fazoviy qatlamlari generatsiya qilinadi. Ushbu ma'lumotlar to'plami ko'p yillik trend tahlillari (Theil-Sen/Mann-Kendall) hamda piksellik korrelyatsiyalar yordamida baholanib, hududning joriy ekologik degradatsiya xavfi raqamli xaritalashtiriladi.

Kelajak prognostik modellarini loyihalashda esa RCP/SSP ssenariylari asosida harorat, yog'in va qurg'oqchilik ko'rsatkichlari olinadi. Agar modelda CA-Markov modeli ishlatilsa, yer yuzasi qoplami o'zgarishi va ekologik xavf zonalarining siljishi prognoz qilinadi. Agar Random Forest yoki Gradient Boosting ishlatilsa, training data asosida kelajakdagi ekologik xavf ehtimolligi aniqlanadi. AHP va Weighted Overlay esa dala ma'lumotlari kam bo'lgan sharoitda ekspert bahosi asosida integral xavf xaritasini olishga imkon beradi.

Ushbu modellashtirish natijasida Qizilqum cho'li hududi ekologik holati bo'yicha juda past, past, o'rtacha, yuqori va juda yuqori degradatsiya xavfi sinflariga ajratiladi. Bunday sinflashtirish muhofaza etiladigan hududlarni kengaytirish, arid yaylovlar ekotizimlarini barqaror boshqarish, kon-metallurgiya sanoati zonalarining texnogen ta'sirini huquqiy tartibga solish hamda uzoq muddatli geoeologik monitoring tizimini yo'lga qo'yish uchun fundamental amaliy-amaliy ahamiyatga ega.



7-rasm. Tarixiy ekologik baholash va istiqboldagi iqlim ssenariylari (RCP/SSP) asosida ekotizim dinamikasini prognozlash metodologik zanjiri

Ilmiy yangilik va tadqiqot bo'shlig'i.

Mavjud ilmiy tadqiqotlar doirasida Markaziy Osiyo va Orol dengizi havzasi miqyosida vegetatsiya dinamikasi, qurg'oqchilik, yer degradatsiyasi va iqlimiy omillar ta'sirini baholash bo'yicha salmoqli natijalarga erishilgan. Biroq, aynan Qizilqum cho'lining o'ziga xos regional geoeologik xususiyatlari doirasida NDVI, NDMI, LST, BSI, PET, atmosfera yog'inlari, aridlik indeksi hamda antropogen ekologik yuklama qatlamlarini yagona, ko'p faktorli va integral tizimli geoeologik modelda sintez qilish bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar yetarlicha tizimli emas va uslubiy bo'shliqlar mavjud.

Shu nuqtayi nazardan, Qizilqum cho'li uchun taklif etilayotgan modelning ilmiy yangiligi quyidagi konseptual jihatlar bilan belgilanadi.

1. Cho'l ekotizimi dinamikasi va degradatsiyasi faqatgina an'anaviy vegetatsiya indeksleri (NDVI) orqali emas, balki iqlimiy anomaliyalar, gidrotermik rejim, termik sirt parametrlari (LST), tuproq-biofizik xususiyatlari (BSI) hamda real vaqt rejimidagi antropogen bosim indekslarining sinergik aloqadorligi asosida baholanadi.

2. Model landshaftlar transformatsiyasining tarixiy retrospektiv tahlilini, hozirgi ekologik xavf xaritalarini va kelajakdagi iqlimiy-antropogen prognoz ssenariylarini yagona uzluksiz metodik zanjirga birlashtiradi.

Mazkur tizimli yondashuv Qizilqum cho'lida ekologik xavf zonalarini aniqlash, degradatsiya jarayonlarini harakatga keltiruvchi yetakchi omillarni miqdoriy ajratish hamda iqlim o'zgarishiga moslashish bo'yicha hududiy strategik tavsiyalar ishlab chiqish imkonini beradi.

XULOSALAR

1. Tizimli tahlil qilingan fundamental ilmiy manbalar Qizilqum cho'li ekotizimi dinamikasini modellastirishda masofadan zondlash va GAT texnologiyalarining yuqori interpretatsion samaradorligini tasdiqlaydi. Arid cho'l sharoitida yer usti yashil biomassasini baholashda NDVI tayanch ko'rsatkich hisoblansa-da, tizimli xatoliklarni



kamaytirish uchun uni LST, NDMI, BSI, PET, atmosfera yog'inlari va regional aridlik indeksleri (AI) bilan ko'p faktorli integratsiyalash zarur.

2. Qizilqum cho'li ekotizimlarida global iqlim o'zgarishi anomaliyalari asosan haroratining ortishi, potensial evapotranspiratsiyaning (PET) jadallashishi, tuproq namlik zaxirasining kamayishi va ekstremal qurg'oqchilik xavfining ortishi orqali namoyon bo'ladi. Ushbu ko'rsatkichlar birgalikda o'simliklar qoplaminig kamayishiga, efemeroidlar vegetatsiya davrining qisqarishiga va ekotizimlar barqarorligining buzilishiga olib kelishi mumkin.

3. Markaziy Osiyo va Orol dengizi havzasida o'tkazilgan tadqiqotlar Qizilqum cho'li uchun mukammal uslubiy transfer imkoniyatini beradi. Xususan, ko'p yillik NDVI trend tahlillari (Theil-Sen/Mann-Kendall), iqlimiy va antropogen omillarni miqdoriy differensiyalovchi RESTREND algoritmi, faktorlar ulushini aniqlovchi GeoDetector modeli, ko'p mezonli qaror qabul qilish (AHP/Weighted Overlay) hamda Machine Learning (Random Forest/Gradient Boosting) metodlari Qizilqum geotizimlari dinamikasini fazoviy baholashda eng ishonchli instrumental apparat ekanligi isbotlandi.

4. Taklif etilayotgan Integral degradatsiya xavfi modeli (IDRM) Qizilqum cho'li hududini ekologik xavf darajasiga ko'ra beshta standart sinfga ajratish, 2000–2025-yillardagi retrospektiv dinamikani baholash hamda CMIP6 (SSP2-4.5 va SSP5-8.5) ssenariylari asosida 2030–2050-yillarga mo'ljallangan ekologik xavf ssenariylarini ishlab chiqishga imkon beradi.

5. Kelgusida ishlab chiqilgan ushbu integral model arxitekturasini dala kuzatuvlari ma'lumotlari, yaylovlar yuklamasi, tuproqning sho'rlanish darajasi, kon-metallurgiya sanoatining texnogen areallari hamda muhofaza etiladigan tabiiy hududlarning dinamik chegaralari bilan boyitish Qizilqum cho'li ekotizimlarini barqaror boshqarish hamda iqlim o'zgarishiga moslashish bo'yicha yuqori aniqlikdagi hududiy strategik tavsiyalar ishlab chiqish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Jiang, L., Jiapaer, G., Bao, A., Guo, H., & Ndayisaba, F. (2017). Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia. *Science of the Total Environment*, 599–600, 967–980. doi.org
2. Rivera-Marin, D., Dash, J., & Ogutu, B. (2022). The use of remote sensing for desertification studies: A review. *Journal of Arid Environments*, 206, Article 104829. doi.org
3. Berdimbetov, T., Ma, Z.-G., Shelton, S., Ilyas, S., & Nietullaeva, S. (2021). Identifying land degradation and its driving factors in the Aral Sea Basin from 1982 to 2015. *Frontiers in Earth Science*, 9, Article 690000. doi.org



4. Xing, X., Qian, J., Chen, X., Chen, C., Sun, J., Wei, S., Yimamaidi, D., & Zhanar, Z. (2022). Analysis of effects of recent changes in hydrothermal conditions on vegetation in Central Asia. *Land*, 11(3), Article 327. doi.org
5. Rakhmatova, N., Nishonov, B. E., Kholmatjanov, B. M., Rakhmatova, V., Toderich, K. N., Khasankhanova, G. M., Shardakova, L., Khujanazarov, T., Ungalov, A. N., & Belikov, D. A. (2024). Assessing the potential impacts of climate change on drought in Uzbekistan: Findings from RCP and SSP scenarios. *Atmosphere*, 15(7), Article 866. doi.org
6. Gao, C., Ren, X., Fan, L., He, H., Zhang, L., Zhang, X., Li, Y., Zeng, N., & Chen, X. (2023). Assessing the vegetation dynamics and its influencing factors in Central Asia from 2001 to 2020. *Remote Sensing*, 15(19), Article 4670. doi.org
7. Burrell, A. L., Evans, J. P., & De Kauwe, M. G. (2020). Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification. *Nature Communications*, 11(1), Article 3853. doi.org
8. Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., & Guo, R. (2016). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6(2), 166–171. doi.org
9. Wang, L., Jiao, W., MacBean, N., Rulli, M. C., Manzoni, S., Vico, G., & D'Odorico, P. (2022). Dryland productivity under a changing climate. *Nature Climate Change*, 12(11), 981–994. doi.org
10. Formica, A. F., Burnside, R. J., & Dolman, P. M. (2017). Rainfall validates MODIS-derived NDVI as an index of spatio-temporal variation in green biomass across non-montane semi-arid and arid Central Asia. *Journal of Arid Environments*, 142, 11–21. doi.org