UO'K: 556.3:004

YER OSTI SUV RESURSLARINI BOSHQARISHDA RAQAMLI TEXNOLOGIYALARNING O'RNI

Karimov Anvarjon Mukumjonovich
Andijon davlat unversiteti "Kompyuter injineringi" kafedrasi kata o'qituvchisi
anvarjonkarimov1987@gmail.com
Usmonbekova Rayona Oybek qizi
Andijon davlat universiteti menejment yo'nalishi 1-kurs talabasi
usmonbekovarayona@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.24139989

Annotatsiya. Maqolada yer osti suv resurslarini boshqarishda raqamli texnologiyalarning o'rni tahlil qilinadi. Xalqaro va mahalliy ilmiy manbalar hamda O'zbekistondagi joriy loyihalar axboroti asosida raqamli vositalar boshqaruv zanjiri bo'yicha besh funksional toifaga ajratildi: kuzatuv, ma'lumot uzatish va saqlash, modellashtirish, qaror qabul qilishni qo'llab-quvvatlash hamda boshqaruv choralari. Farg'ona vodiysi, Qashqadaryo va Ohangaron havzasidagi tashabbuslar shu toifalar bo'yicha tizimlashtirildi. Ohangaron daryosi allyuvial suv qatlami misolida raqamli modellashtirish iqlim stsenariylarida zaryadlanish va zaxiraning mavsumiy o'zgarishini ko'rsatishi bayon etildi. Raqamli texnologiyalar boshqaruv qarorlari uchun ishonchli ma'lumot asosini yaratadi, ammo ularning samarasi institutsional va iqtisodiy mexanizmlar bilan uyg'unlikka bog'liq degan xulosaga kelindi.

Kalit so'zlar: yer osti suvlari, raqamli texnologiyalar, monitoring, modellashtirish, MODFLOW, Farg'ona vodiysi, suv resurslarini boshqarish.

KIRISH

Yer osti suvlari ichimlik suvi ta'minoti va sug'orma dehqonchilikning muhim manbai bo'lib, iqlim o'zgarishi va suvga talab ortayotgan sharoitda uning ahamiyati kuchaymoqda. Jasechko va hammualliflar (2024) dunyoning 40 dan ortiq mamlakatidagi taxminan 170 ming monitoring quduqlari va 1693 suv tutuvchi tizim ma'lumotlarini tahlil qilib, yer osti suvlari sathining yiliga 0,5 metrdan ortiq pasayishi XXI asrda, ayniqsa quruq va sug'orma dehqonchilik keng rivojlangan hududlarda keng tarqalganini ko'rsatdilar. Shu bilan birga, ayrim hududlarda siyosat o'zgarishi, sun'iy zaryadlash va muqobil suv manbalari hisobiga sathning tiklanishi ham qayd etilgan, ya'ni yer osti suvlarining kamayishi muqarrar emas.

O'zbekiston uchun mavzu alohida dolzarb. Rakhmatullaev va hammualliflar (2012) mustaqillikdan keyin tabiiy resurslar va suv infratuzilmasini boshqarishda institutsional o'zgarishlar amalga oshirilgan bo'lsa-da, yer osti suvlaridan foydalanish va ularni boshqarish tizimlari yetarli rivojlanmaganini, haddan tashqari sug'orish esa tuproq sho'rlanishiga olib kelayotganini ta'kidlaydilar. Bunday sharoitda boshqaruv qarorlari ishonchli, muntazam yangilanadigan ma'lumotga tayanishi zarur. Raqamli texnologiyalar (datchiklar, ma'lumot uzatish tarmoqlari, GIS, matematik modellar) aynan shu imkoniyatni beradi.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Ushbu maqolada "raqamli texnologiyalar" deganda yer osti suvlari haqida ma'lumot olish, uzatish, saqlash, tahlil qilish va boshqaruv qarorlarini qo'llab-quvvatlash uchun ishlatiladigan axborot-kommunikatsiya vositalari majmui tushuniladi. Bunga avtomatik datchiklar, masofadan zondlash ma'lumotlari, geoaxborot tizimlari, sonli oqim modellari va quduqlarni masofadan boshqarish vositalari kiradi.

Biroq amaliyotda raqamli vositalar ko'pincha alohida loyihalar doirasida qo'llaniladi va ularning boshqaruv zanjiridagi o'rni yaxlit ko'rinishda bayon etilmaydi. **Tadqiqotning maqsadi** — yer osti suv resurslarini boshqarishda raqamli texnologiyalarning o'rnini aniqlash. **Vazifalar:** (1) raqamli vositalarni boshqaruvdagi vazifasiga ko'ra tasniflash; (2) O'zbekistondagi amaliy tashabbuslarni shu tasnif asosida tahlil qilish; (3) raqamli modellashtirishning boshqaruvdagi ahamiyatini aniq misolda ko'rsatish.

METODLAR

Tadqiqot tavsifiy-tahliliy xarakterga ega. Manbalar ikki guruhga bo'lindi: (a) hakamlik qilinadigan ilmiy jurnallardagi maqolalar (*Nature*, *Water*, *Central European Journal of Geosciences*); (b) loyihalar haqidagi rasmiy axborotlar (UzA, O'zbekiston Respublikasi hukumat portali, xalqaro tashkilotlarning tender xabarnomasi). Qidiruv 2026-yil noyabr oyida ingliz tilidagi manbalar bo'yicha amalga oshirildi; ilmiy maqolalardagi raqamlar asl manbadan olindi, rasmiy axborotlardagi ma'lumotlar esa loyiha rejalari sifatida talqin qilindi.

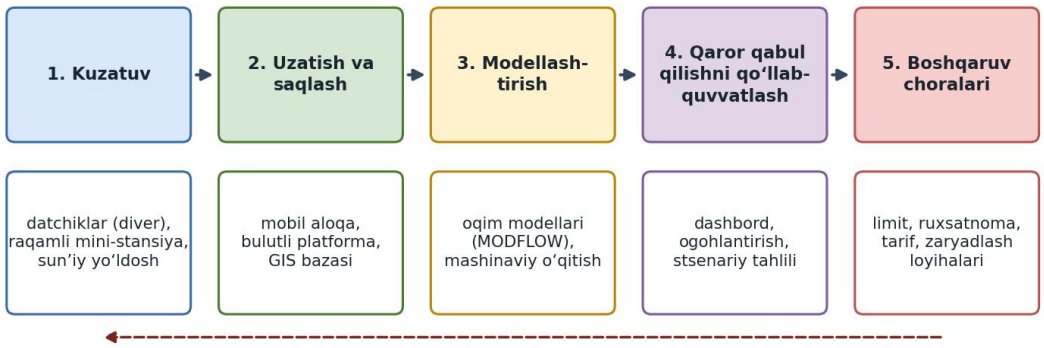
Tahlil to'rt bosqichda olib borildi: birinchi bosqichda raqamli vositalar boshqaruvdagi funksiyasiga ko'ra toifalarga ajratildi; ikkinchi bosqichda O'zbekistondagi tashabbuslar shu toifalar bo'yicha joylashtirildi; uchinchi bosqichda Ohangaron daryosi allyuvial suv qatlami bo'yicha raqamli modellashtirish natijalari (Kadirkhodjaev et al., 2025) misol sifatida tahlil qilindi; to'rtinchi bosqichda boshqaruv uchun xulosalar shakllantirildi. Tadqiqot tizimli sharh (systematic review) emas va raqamli loyihalarning iqtisodiy samaradorligini o'lchamaydi.

NATIJALAR

3.1. Raqamli texnologiyalarning funksional tasnifi

Tahlil natijasida raqamli vositalar boshqaruv zanjirining besh bo'g'ini bo'yicha tasniflandi (1-rasm). Har bir bo'g'inning vazifasi va asosiy cheklovi 1-jadvalda keltirilgan. Muhim jihat shundaki, zanjir yopiq: boshqaruv choralari (limit, tarif, sun'iy zaryadlash) natijasi yana kuzatuv tarmog'i orqali baholanadi. Sun'iy yo'ldosh gravimetriyasi (GRACE) mintaqaviy miqyosda zaxira o'zgarishini baholashga imkon beradi (Rodell et al., 2009), lekin uning fazoviy ajrata olish qobiliyati yirik, shu sababli quduq o'lchovlari muhim bo'lib qolmoqda (Jasechko et al., 2024).

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.



1-rasm. Yer osti suvlarini boshqarishda raqamli texnologiyalar zanjiri (muallif tasnifi)

1-jadval. Raqamli vositalar toifalari, vazifasi va cheklovlari

Kuzatuv bo'g'ida asosiy o'zgarish qo'lda o'lchashdan avtomatik datchiklarga o'tishdir: bosim

Toifa	Vositalar	Boshqaruvdagi vazifasi	Asosiy cheklov
Kuzatuv	Bosim datchiklari (diver), raqamli mini-stansiyalar, sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari	Sath va zaxira dinamikasini uzluksiz o'lchash	Kalibrlash va texnik xizmat; sun'iy yo'ldosh o'lchamlari yirik
Uzatish va saqlash	Mobil aloqa, bulutli platforma, GIS bazasi	Ma'lumotni yig'ish va yagona bazada jamlash	Ma'lumot standartlari, aloqa qamrovi, kiberxavfsizlik
Modellashtirish	Oqim modellari (MODFLOW), mashinaviy o'qitish	Sath va zaxiraning stsenariy bo'yicha prognozi	Ko'p yillik sifatli ma'lumot talab qiladi
Qaror qabul qilishni qo'llab-quvvatlash	Dashbord, ogohlantirish tizimlari	Qarorlarni ma'lumot bilan asoslash	Xodimlarning tayyorgarligi
Boshqaruv choralari	Quduqlarni masofadan nazorat qilish, hisob moslamalari	Olinadigan suv hajmini hisobga olish, limit va ruxsatnomalar	Quduqlar soni ko'p, moliyalashtirish

datchiklari sath ma'lumotini belgilangan oraliqda yozib boradi, mini-stansiyalar esa uni aloqa kanali orqali markaziy bazaga yuboradi. Natijada ma'lumot kech emas, deyarli real vaqtda hosil bo'ladi va tahlilchi uni faqat mavsumiy ko'rik natijalariga emas, kunlik tebranishlarga ham tayanib baholay oladi. Saqlash bo'g'ida GIS bazasi gidrogeologik xaritalar, quduq pasportlari va o'lchov qatorlarini bir joyda

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

birlashtiradi; modellashtirish bo'g'i esa shu qatorlardan foydalanib, boshqaruv qarori qabul qilinishidan oldin turli stsenariylarni solishtirish imkonini beradi.

3.2. O'zbekistondagi amaliy tashabbuslar

Ochiq manbalardagi axborotga ko'ra, so'nggi yillarda respublikada raqamli yo'nalishdagi bir necha tashabbus amalga oshirilmoqda (2-jadval). Ular asosan kuzatuv, ma'lumot saqlash va quduqlarni boshqarish bo'g'inlarini qamrab oladi; Farg'ona vodiysi, jumladan Andijon viloyati joylashgan hudud monitoring tarmog'ini kengaytirish bo'yicha ustuvor hudud sifatida ko'rinadi.

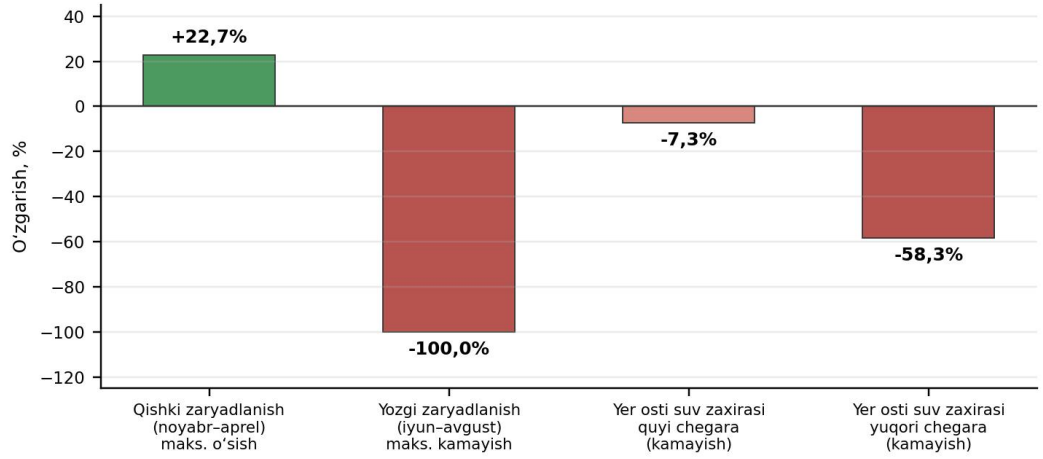
Tashabbus	Hudud	Raqamli komponent	Toifa
Farg'ona vodiysi yer osti suvlarini boshqarish loyihasi (Namangan davlat texnika universiteti va GeoGold Kárpátia kelishuvi)	Farg'ona vodiysi	245 ta raqamli mini-stansiyani ishlab chiqish va tayyorlash; 5 yillik muddat; shartnoma qiymati 1 mln AQSH dollari (Alimova, 2026)	Kuzatuv
Farg'ona vodiysi suv resurslarini boshqarish loyihasi, 2-bosqich	Farg'ona vodiysi	1300 to'plam gidrostatik sath datchigi (diver) xaridi; Jahon banki va Yevropa Ittifoqi granti (DevelopmentAid, 2026)	Kuzatuv
O'zbekiston–Finlyandiya (GTK) hamkorligi	Respublika; Ohangaron tajriba maydoni	Gidrogeologik xaritalarni ArcGIS'da raqamlashtirish, yagona milliy baza, oqim modellari (Embassy of Uzbekistan in Pakistan, n.d.)	Saqlash, modellashtirish
"Oqil quduq" raqamlashtirish texnologiyasi ("Qashqadaryo tajribasi")	Qashqadaryo viloyati	Vertikal sug'orish quduqlarini raqamli boshqarish; suv va energiyani tejash (Ministry of Mining Industry and Geology, 2026)	Boshqaruv choralari

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

2-jadval. O‘zbekistondagi raqamli tashabbuslar (ochiq manbalar asosida)

3.3. Raqamli modellashtirish misoli: Ohangaron daryosi suv qatlami

Kadirkhodjaev va hammualliflar (2025) Toshkent viloyatidagi Ohangaron daryosi allyuvial suv qatlami uchun uch o‘lchamli MODFLOW modelini yaratib, SSP5-8.5 iqlim stsenariysida 2020–2099-yillar oralig‘ini baholadilar; modelni kalibrlash xatosi (RMSE) 0,25–0,51 m oralig‘ida bo‘lgan. Modelga ko‘ra, suv qatlami kirimining 84 foizdan ortig‘i yuqori oqim va yon vodiylardagi yotqiziqlardan keladi, yog‘in va daryo o‘zani orqali bevosita zaryadlanish esa atigi 11,4 foizni tashkil etadi. Zaryadlanish asosan noyabrdan aprelgacha yuz beradi, iyun–avgustda deyarli kuzatilmaydi. Kelgusi iqlim sharoitida qishki zaryadlanish 22,7 foizgacha ortishi, yozgi zaryadlanish esa 100 foizgacha kamayishi, yer osti suv zaxirasi 2010–2020-yillarga nisbatan 7,3–58,3 foizga qisqarishi mumkinligi hisoblangan (2-rasm).



2-rasm. Ohangaron suv qatlamida SSP5-8.5 stsenariysi bo‘yicha prognoz qilingan o‘zgarishlar (Kadirkhodjaev et al., 2025 ma’lumotlari asosida muallif tayyorlagan)

3.4. Monitoringdan boshqaruv qaroriga o‘tish

Raqamli ma’lumot boshqaruvga aylanishi uchun uni oldindan kelishilgan indikatorlar bilan bog‘lash lozim. Masalan, sathning yillik pasayish sur’ati ogohlantirish ko‘rsatkichi sifatida olinishi mumkin: Jasechko va hammualliflar (2024) tahlilida yiliga 0,5 metrdan ortiq pasayish “tez pasayish” mezoni sifatida qo‘llangan. Muallif fikricha, shunga o‘xshash chegara qiymatlar har bir havza uchun mahalliy sharoitga moslab belgilanishi, ular oshganda esa avtomatik ogohlantirish yuborilishi va olinadigan suv hajmini cheklash yoki muqobil manbaga o‘tish bo‘yicha qarorlar tayyorlanishi mumkin. Bu yondashuv 1-rasmdagi zanjirni amaliy qarorlar bilan yopadi, ammo chegara qiymatlarni asoslash uchun havzaning o‘zidan kamida bir necha yillik kuzatuv qatori talab etiladi.

MUHOKAMA

Natijalar raqamli texnologiyalarning asosiy qiymati alohida qurilmalarda emas, ularning boshqaruv zanjirida bog‘lanishida ekanini ko‘rsatadi. Ohangaron misoli shuni tasdiqlaydiki, model qaysi hududlar (yuqori oqim, yon vodiylar) va qaysi fasl (yoz) boshqaruv uchun hal qiluvchi ekanini aniqlab beradi; ammo model sifati uzoq muddatli monitoring ma’lumotiga bog‘liq, mualliflarning o‘zlari ham doimiy kuzatuv va adaptiv boshqaruv zarurligini ta’kidlaydilar. Shu sababli Farg‘ona vodiysidagi datchik va mini-stansiyalarni ko‘paytirish bo‘yicha loyihalar (2-jadval) kelgusida bunday modellarni qurish uchun poydevor bo‘lishi mumkin.

Ikkinchidan, texnologiya o‘zi yetarli emas. Jasechko va hammualliflar (2024) kuzatgan tiklanish holatlari siyosat o‘zgarishlari, muqobil manbalar va sun’iy zaryadlash bilan bog‘liq; Rakhmatullaev va

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

hammualliflar (2012) esa O'zbekistonda muammo institutsional zaiflikda ekanini ko'rsatgan. Bundan muallifning xulosasi: raqamli ma'lumotlar limit, ruxsatnoma va tarif kabi iqtisodiy-boshqaruv mexanizmlari uchun asos bo'lgandagina samara beradi, aks holda ular faqat axborot to'plamiga aylanib qoladi.

Iqtisodiy nuqtai nazardan, quduq darajasidagi raqamli hisob suvdan foydalanishning haqiqiy hajmi va energiya sarfini ko'rsatadi. Bu esa limit belgilash, ruxsatnomalarni qayta ko'rib chiqish va suv tejaydigan foydalanuvchilarni rag'batlantirish kabi boshqaruv mexanizmlarini asoslashga yordam beradi; "Qashqadaryo tajribasi"da suv va energiyani tejash maqsadi aynan shu bilan bog'liq (Ministry of Mining Industry and Geology, 2026). Shu bilan birga, bunday mexanizmlarning samarasi hozircha ochiq manbalarda miqdoriy ko'rsatilmagan, shuning uchun bu fikr tahliliy xarakterga ega.

Uchinchidan, joriy etishda bir qator to'siqlar kutiladi: ma'lumot standartlarining yagona emasligi, datchiklarni kalibrlash va texnik xizmat ko'rsatish xarajatlari, mutaxassislar tayyorgarligi va ma'lumotlar xavfsizligi. Shuning uchun quyidagi yo'nalishlar maqsadga muvofiq: (1) monitoring ma'lumotlarini yagona milliy bazaga standart formatda jamlash; (2) monitoring tarmog'ini oqim modellari bilan bog'lash; (3) quduq darajasidagi hisobni limit va tariflarni asoslashda qo'llash; (4) mutaxassislarni raqamli vositalar bilan ishlashga o'qitish. Tadqiqotning cheklovi: 2-jadvaldagi ma'lumotlar loyiha rejalari va rasmiy axborotga tayanadi, ularning amaldagi samaradorligi hali o'lchanmagan. Keyingi bosqichda pilot hududda monitoring ma'lumotlari asosida samarani miqdoriy baholash rejalashtirilmoqda.

XULOSA

Tahlil shuni ko'rsatdiki, raqamli texnologiyalar yer osti suv resurslarini boshqarishda kuzatuvdan boshqaruv choralarigacha bo'lgan yaxlit zanjirning ma'lumot asosini tashkil etadi. O'zbekistonda Farg'ona vodiysi, Qashqadaryo va Ohangaron havzasidagi tashabbuslar bu zanjirning kuzatuv, saqlash, modellashtirish va quduqlarni boshqarish bo'g'inlarini rivojlantirmoqda. Ohangaron misoli raqamli modellashtirish mavsumiy tanqislik xavfini oldindan ko'rsatishi mumkinligini namoyon etadi. Raqamli vositalarning samarasi esa ma'lumotning yagona bazada jamlanishi, institutsional tayyorgarlik va iqtisodiy mexanizmlar bilan uyg'unligiga bog'liq.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Alimova, A. (2026). *Uzbekistan and Hungary implement a digital groundwater monitoring project*. UzA. https://uza.uz/ar/posts/uzbekistan-and-hungary-implement-a-digital-groundwater-monitoring-project_930169

2. DevelopmentAid. (2026, January 8). *Ferghana Valley water resources management – Phase II: Procurement of hydrostatic level gauges (divers) to enhance groundwater level monitoring* [Tender notice OP00402158]. https://www.developmentaid.org/tenders/view/1557400/ferghana-valley-water-resources-management-phase-ii-ferghana-valley-water-resources-management-phase

3. Embassy of the Republic of Uzbekistan in Pakistan. (n.d.). *Uzbekistan and Finland: Digital groundwater modeling as a contribution to climate resilience in Central Asia*. https://pakistan.mfa.uz/en/news/uzbekistan-i-finliandiia-cifrovoe-modelirovanie-podzemnyx-vod-kak-vklad-v-klimaticeskuiu-ustoicivost-centralnoi-azii

4. Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O., & Kirchner, J. W. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature, 625*(7996), 715–721. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

5. Kadirkhodjaev, A., Andreev, D., Akramov, B., Abdullaev, B., Abdujalilova, Z., Umarova, Z., Nazipova, D., Ruzimov, I., Toshev, S., Anorboev, E., Rakhimov, N., Mamirov, F., Gracheva, I., & Luoma, S. (2025). Assessing climate change impacts on groundwater recharge and storage using MODFLOW in the Akhangaran River alluvial aquifer, Eastern Uzbekistan. *Water, 17*(15), Article 2291. https://doi.org/10.3390/w17152291

6. Ministry of Mining Industry and Geology of the Republic of Uzbekistan. (2026, August 13). *"Kashkadarya Experience" in the rational use and automation of groundwater studied* [News]. https://gov.uz/en/mingeo/news/view/205783

7. Rakhmatullaev, S., Huneau, F., Kazbekov, J., Celle-Jeanton, H., Motelica-Heino, M., Le Coustumer, P., & Jumanov, J. (2012). Groundwater resources of Uzbekistan: An environmental and operational overview. *Central European Journal of Geosciences, 4*(1), 67–80. https://doi.org/10.2478/s13533-011-0062-y

8. Rodell, M., Velicogna, I., & Famiglietti, J. S. (2009). Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature, 460*(7258), 999–1002. https://doi.org/10.1038/nature08238

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.