

SUG'ORILADIGAN AGROEKOTIZIMLARNING MELIORATIV HOLATINI ADAPTIV BOSHQARISHDA SUV-TUZ ALMASHINUVI VA SIZOT SUVLARI REJIMI MODELLARIDAN FOYDALANISH

Bozorov Ma'ruf Abdimalik o'g'li

Annotatsiya. Maqolada sug'oriladigan agroekotizimlarning meliorativ holatini boshqarishda suv-tuz almashinuvi va sizot suvlari rejimini yagona matematik model doirasida ifodalash yondashuvi taklif etiladi. Tadqiqotning metodologik asosi sifatida tuproqdagi suv harakatini Richards tenglamasi, erigan tuzlar migratsiyasini adveksiya-dispersiya tenglamasi, sizot suvlari dinamikasini esa filtratsiya va suv balansi tenglamalari orqali tavsiflash ko'rib chiqilgan. Modelga tuproq namligi, elektr o'tkazuvchanlik, sizot suvi sathi va minerallashuvi, sug'orish hajmi, atmosfera yog'ini hamda evapotranspiratsiya kabi monitoring ko'rsatkichlarini kiritish nazarda tutiladi. Adaptiv boshqaruv algoritmi prognoz qilingan sho'rlanish va sizot suvi sathi kritik chegaralarga yaqinlashganda sug'orish me'yorini, sug'orish oralig'ini va drenaj ish rejimini qayta hisoblash tamoyiliga asoslanadi. Taklif etilgan yondashuv meliorativ holatni faqat faktik baholashdan prognozli va qayta aloqa asosidagi boshqaruvga o'tkazish imkonini beradi. Metodologiya O'zbekistonning arid va yarim arid sug'oriladigan hududlariga, jumladan Qashqadaryo kabi suv tanqisligi va sizot suvlari rejimi o'zgaruvchan bo'lgan zonalarga moslashtirilishi mumkin.

Abstract. The paper proposes an integrated mathematical approach for adaptive management of irrigated agroecosystems by coupling water-salt exchange in the root zone with groundwater regime dynamics. Soil water flow is represented by the Richards equation, dissolved salt transport by an advection-dispersion equation, and groundwater dynamics by groundwater flow and water-balance formulations. The framework incorporates monitoring data on soil moisture, electrical conductivity, groundwater depth and mineralization,





irrigation depth, precipitation, and evapotranspiration. The adaptive control algorithm updates irrigation and drainage actions whenever forecast salinity or groundwater depth approaches predefined thresholds. The main scientific contribution is the transition from static reclamation assessment to forecast-based feedback control, where the model is continuously corrected using field observations. The approach can be adapted to irrigated arid and semi-arid zones of Uzbekistan, where shallow groundwater, water scarcity, and secondary salinization interact.

Аннотация. В статье предложен интегрированный математический подход к адаптивному управлению мелиоративным состоянием орошаемых агроэкосистем на основе совместного моделирования водно-солевого обмена в корнеобитаемом слое и режима грунтовых вод. Движение воды описывается уравнением Ричардса, перенос растворённых солей — уравнением адвекции-дисперсии, а динамика грунтовых вод — уравнениями фильтрации и водного баланса. В систему мониторинга включаются влажность почвы, электропроводность, глубина и минерализация грунтовых вод, оросительная норма, атмосферные осадки и эвапотранспирация. Адаптивный алгоритм управления предусматривает корректировку режима орошения и дренажа при приближении прогнозируемой засоленности и уровня грунтовых вод к критическим значениям. Подход ориентирован на переход от разовой оценки мелиоративного состояния к прогнозному управлению с обратной связью и может быть адаптирован к аридным и полупустынным орошаемым территориям Узбекистана.

Kalit soʻzlar: suv-tuz almashinuvi, sizot suvlari, tuproq shoʻrlanishi, matematik modellashtirish, Richards tenglamasi, adveksiya-dispersiya, drenaj, adaptiv boshqaruv, meliorativ monitoring, sugʻorish.

KIRISH. Sugʻoriladigan yerlarning uzoq muddatli unumdorligi suv rejimi, tuzlar harakati va sizot suvlari dinamikasining oʻzaro bogʻlanganligiga bevosita

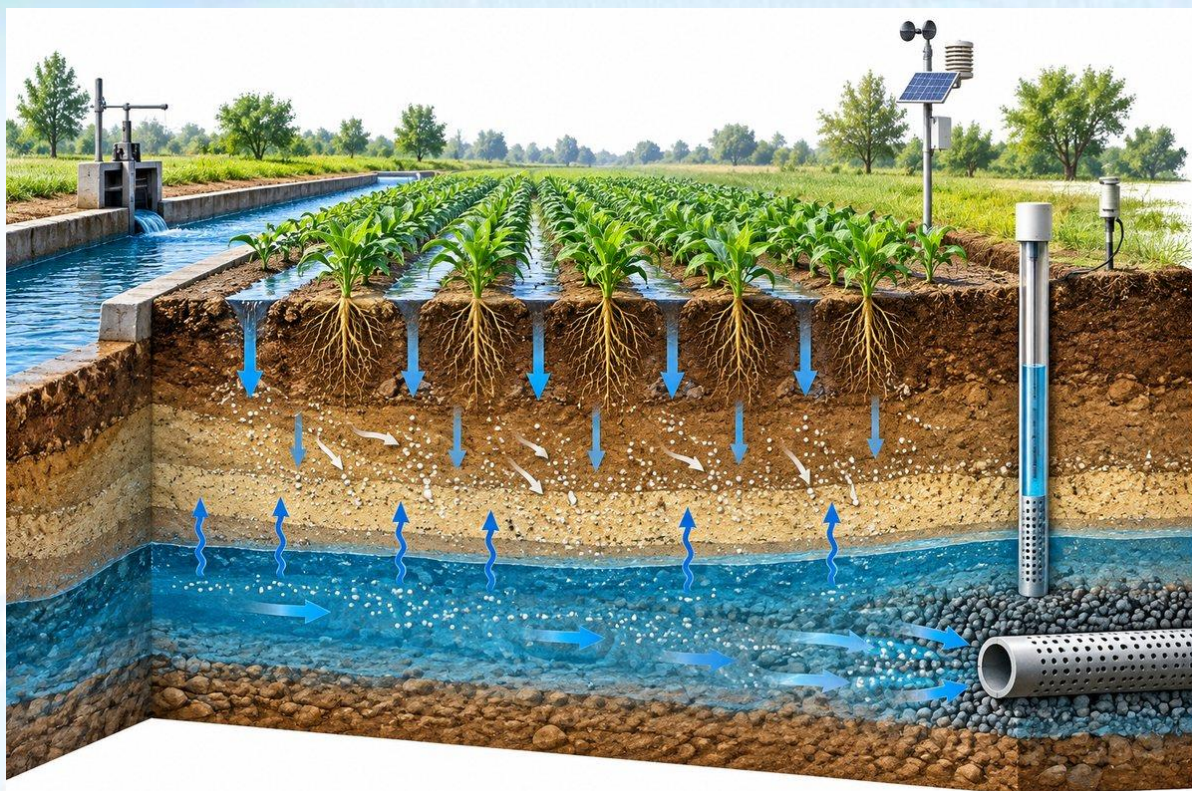
bog'liq. Sug'orish vaqtida tuproq profiliga kirgan suvning bir qismi o'simlik evapotranspiratsiyasiga sarflanadi, bir qismi tuproqda vaqtincha saqlanadi, ortiqcha qismi esa chuqur filtratsiya orqali sizot suvlarini to'ldiradi. Suv bilan birga kirgan erigan tuzlar esa ildiz zonasida to'planishi yoki yuvilib pastki qatlamlarga o'tishi mumkin. Drenaj yetarli bo'lmagan sharoitda sizot suvlarining sathi ko'tarilib, kapillyar ko'tarilish orqali tuzlarning yana ildiz qatlamiga qaytishi ikkilamchi sho'rlanishni kuchaytiradi.

FAO ma'lumotlariga ko'ra, 2024-yilda e'lon qilingan global baholashda 1,381 mln gektardan ortiq yer turli darajada tuz ta'siriga uchragan deb qayd etilgan. O'zbekiston bo'yicha FAO 2026-yilgi mamlakat axborotida 1,9 mln gektar sug'oriladigan ekin maydonining taxminan 45 foizi sho'rlanish ta'sirida ekani ko'rsatiladi. Bu ko'rsatkichlar sho'rlanishni faqat yakuniy laboratoriya ko'rsatkichi sifatida emas, balki suv berish, sizot suvlari va drenaj boshqaruvi bilan birgalikda qarash zarurligini ko'rsatadi.

So'nggi tadqiqotlar O'zbekiston sharoitida sizot suvlari sathi va mineralizatsiyasi hamda tuproq sho'rlanishi o'rtasidagi aloqalar hududiy va vaqt bo'yicha sezilarli ekanini ko'rsatmoqda. Sirdaryo viloyati misolida sizot suvlari rejimi va mineralizatsiyasi sho'rlanishning asosiy drayverlari sifatida baholangan; Amudaryo deltasi uchun esa yaxshilangan sug'orish, drenaj va kombinatsiyalangan boshqaruv ssenariylari raqamli model yordamida solishtirilgan. 2026-yilgi tadqiqotda qishloq xo'jaligi modeli bilan HYDRUS-1D ni birlashtirish orqali chuqur drenaj va sizot suvlari ko'tarilishini birgalikda baholash imkoniyati ko'rsatilgan.

Shu nuqtai nazardan, mavjud meliorativ boshqaruvni "o'lchash–baholash–choralash" ketma-ketligidan "o'lchash–modellashtirish–prognozlash–optimallashtirish–qayta aloqa" sikliga o'tkazish ilmiy va amaliy jihatdan muhimdir. Mazkur maqolaning maqsadi sug'oriladigan agroekotizimlarda suv-tuz almashinuvi va sizot suvlari rejimini birlashtiruvchi model hamda uning asosida adaptiv boshqaruv algoritmini shakllantirishdan iborat.





1-rasm. Sug'oriladigan agroekotizimda suv, tuz va sizot suvlari o'rtasidagi asosiy fizik jarayonlarning sxematik ko'rinishi.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Taklif etilayotgan yondashuvning markazida uchta o'zaro bog'langan model komponenti turadi: (1) tuproqdagi suv harakati; (2) tuzlarning ildiz zonasi bo'ylab ko'chishi; (3) sizot suvlari sathi va oqimi. Bunday bog'lash suv-tuz balansining vaqt bo'yicha o'zgarishini va uning sizot suvlari bilan ikki tomonlama aloqasini hisobga olish imkonini beradi. Modelning hisoblash bosqichi dala kuzatuvlari bilan muntazam ravishda yangilanadi.

Tuproqdagi namlik dinamikasi bir o'lchamli vertikal ko'rinishda Richards tenglamasi bilan ifodalanishi mumkin:

$$\partial\theta/\partial t = \partial/\partial z [K(h)(\partial h/\partial z + 1)] - S$$

$$\partial(\theta C)/\partial t = \partial/\partial z (\theta D \partial C/\partial z) - \partial(qC)/\partial z - SC$$

$$\Delta S^{gw} = R_i + P_e - ET^{gw} - D_r - Q_l$$

$$J = w_1 \cdot E_{sal} + w_2 \cdot E_{gw} + w_3 \cdot V_w + w_4 \cdot E_{ctrl}$$





Bu yerda θ — hajmiy namlik, $K(h)$ — gidravlik o'tkazuvchanlik, h — bosim nabori, S — o'simliklarning suv iste'moli, C — eritmadagi tuz konsentratsiyasi, D — gidrodinamik dispersiya koeffitsiyenti, q — suv oqimi zichligi. Tuz modeli suv oqimi bilan birga advectiv ko'chishni va dispersiv tarqalishni hisobga oladi [6, 7].

Sizot suvlari uchun soddalashtirilgan suv balansi $\Delta S^{gw} = R_i + P_e - ET^{gw} - D_r - Q_l$ ko'rinishida olinadi. Bu yerda R_i — sug'orishdan hosil bo'ladigan qayta oziqlanish, P_e — samarali yog'in, ET^{gw} — sizot suvidan o'simliklar va bug'lanishga qo'shiladigan ulush, D_r — drenaj orqali chiqariladigan suv, Q_l — yonlama chiqim. Amaliy modelda ushbu atamalar MODFLOW/SEAWAT singari yer osti suvlari vositalari yoki mahalliy gidrogeologik tenglamalar bilan hisoblanishi mumkin.

Adaptiv boshqaruvning maqsad funksiyasi J bir vaqtning o'zida sho'rlanish xatosi, sizot suvi sathining xavfli yaqinlashuvi, suv sarfi va boshqaruvning tebranishini minimallashtiradi. Og'irlik koeffitsiyentlari w_1-w_4 hududning agronomik, meliorativ va suv xo'jaligi ustuvorliklariga qarab kalibrlanadi. Shunday qilib, tizim faqat "ko'proq suv berish" tamoyiliga emas, balki ildiz zonasida kerakli namlikni saqlagan holda tuzlarni xavfsiz chiqarish va sizot suvlari sathini nazorat qilishga yo'naltiriladi.

1-jadval. Adaptiv model uchun asosiy kuzatuv va boshqaruv o'zgaruvchilari

Guruh	Ko'rsatkich	O'lchov birligi	Modeldagi vazifasi
Tuproq	Namlik θ	m^3/m^3	Suv holatini kalibrlash va irrigatsiya talabini aniqlash
Tuproq	EC / tuz konsentratsiyasi	dS/m yoki g/L	Sho'rlanish holati va xavfini baholash
Sizot suvi	Sizot suvi	m	Kapillyar ko'tarilish va



	chuqurligi		drenaj zaruratini aniqlash
Sizot suvi	Minerallashuv	g/L yoki dS/m	Ildiz zonasiga tuz oqimini baholash
Meteorologiya	ET _o , yog'in, harorat	mm, °C	Suv talabini va qayta oziqlanishni hisoblash
Boshqaruv	Sug'orish normasi/intervali	mm, kun	Model nazorat signali
Boshqaruv	Drenaj ish rejimi	soat yoki m ³	Sizot sathini pasaytirish nazorati



2-rasm. Modelga kiruvchi monitoring ma'lumotlari, sensorlar, sug'orish va drenaj boshqaruvining integratsiyalashgan konseptual sxemasi.

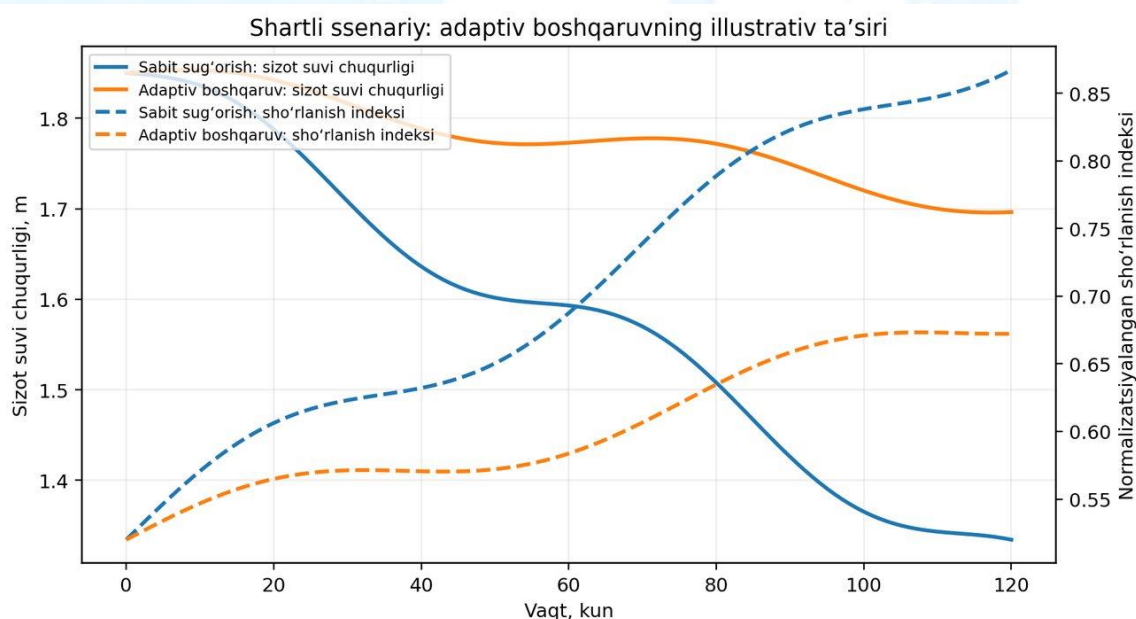
ADAPTIV BOSHQARUV ALGORITMI

Adaptiv boshqaruvda asosiy farq shundaki, qaror faqat joriy o'lchovga emas, balki kelgusi davr uchun model prognoziga asoslanadi. Masalan, tuproqning joriy namligi maqbul bo'lsa ham, prognoz bo'yicha 5–10 kun ichida ET yuqori va yog'in past bo'lishi sababli ildiz zonasida suv tanqisligi yuzaga kelishi kutilsa, tizim sug'orishni oldindan rejalashtiradi. Aksincha, sizot suvlari

sathi kritik chuqurlikka yaqinlashsa va mineralizatsiya yuqori bo'lsa, keyingi sug'orish qisqartiriladi yoki drenajning ish rejimi kuchaytiriladi [2, 4].

Algoritmnining birinchi bosqichida dala sensorlari va agrotexnik ma'lumotlar yagona ma'lumotlar qatlamiga yig'iladi. Ikkinchi bosqichda model parametrlarining bir qismi kuzatuvlarga moslab yangilanadi. Uchinchi bosqichda bir nechta boshqaruv ssenariysi — masalan, odatiy sug'orish, kamaytirilgan sug'orish, davriy yuvish, drenajni kuchaytirish va kombinatsiyalangan rejim — uchun prognozlar hisoblanadi. To'rtinchi bosqichda maqsad funksiyasi eng kichik qiymatga ega ssenariy tanlanadi. Beshinchi bosqichda tanlangan boshqaruv amalda bajariladi va yangi o'lchovlar kelgach, hisoblash sikli takrorlanadi.

Bu yondashuv model parametrlaridagi noaniqlikni ham boshqarish imkonini beradi. Masalan, filtratsiya koeffitsiyenti yoki ildiz zonasining suv ushlab qolish parametrlari mavsum davomida o'zgarishi mumkin. Qayta kalibrlash orqali modelning prognoz xatosi kamaytiriladi. So'nggi tadqiqotlarda qishloq xo'jaligi modeli va HYDRUS-1D ni birlashtirish chuqur drenaj oqimlarini aniqlash va sizot suvlari trendlarini izohlashda samarali ekanligi ko'rsatilgan [5].



3-rasm. Shartli ssenariy: adaptiv boshqaruvda sizot suvi chuqurligi va sho'rlanish indeksining barqarorroq trayektoriyasi. Grafik real dala o'lchovlari emas, usulni tushuntirish uchun normallashtirilgan ilustrativ hisoblashdir.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Metodologik tahlil shuni ko'rsatadiki, meliorativ holatni boshqarishda faqat tuproq sho'rlanishini xaritalash yetarli emas. Sho'rlanishning sababiy mexanizmi — sug'orishdan qayta oziqlanish, suvning chuqur filtratsiyasi, sizot suvi sathining ko'tarilishi, kapillyar ko'tarilish va bug'lanish — vaqt bo'yicha birgalikda qaralishi kerak. FAO tavsiyalarida ham sho'rlanishni nazorat qilish uchun yetarli drenaj, zarur yuvish va muntazam monitoring bir tizim sifatida ko'riladi [1, 9].

O'zbekiston sharoitidagi tadqiqotlar suv va yer resurslarini boshqarishda hududiy tafovutlar katta ekanini ko'rsatadi. Sirdaryo viloyatida yer osti suvlari sathi, mineralizatsiyasi va tuproq sho'rlanishining uzoq muddatli o'zgarishlari GIS asosida baholangan [3]. Amudaryo deltasi bo'yicha esa tomchilatib sug'orish, drenaj va suv manbalarini birgalikda boshqarish ssenariylari gidrogeologik model orqali solishtirilgan [4]. Demak, adaptiv algoritmnining asosiy afzalligi bitta universal sug'orish normasi emas, balki hududga mos boshqaruv signallarini real vaqtga yaqin rejimda yangilab borishidadir.

Model natijalaridan amaliy foydalanishda uchta boshqaruv holatini ajratish mumkin. Birinchi holatda sizot suvi chuqur va sho'rlanish past bo'lsa, tizim suv tejankor sug'orishni ustuvor qiladi. Ikkinchi holatda tuproq sho'rlanishi ortib, sizot suvi ko'tarilayotgan bo'lsa, sug'orish intervalini va drenajni birgalikda optimallashtirish kerak. Uchinchi holatda sizot suvi sayoz va mineralizatsiyasi yuqori bo'lsa, yuvish tadbirlari faqat drenaj sig'imi bilan birgalikda rejalashtirilishi lozim; aks holda tuzlar ildiz zonasidan chiqarilgan bo'lsa ham, pastki qatlamdan qayta yuqoriga ko'tarilishi mumkin [2, 9].

Taklif etilayotgan tizimning yana bir ustunligi — masofadan zondlash ma'lumotlarini yer usti sensorlari bilan birlashtirish imkoniyatidir. Sun'iy



yo'ldosh tasvirlaridan vegetatsiya indeksleri va sho'rlanishga sezgir spektral ko'rsatkichlar olinib, nuqtaviy sensor ma'lumotlari bilan kalibrlanishi mumkin. Bunda GIS qatlamlari modelning boshlang'ich va chegaraviy shartlarini fazoviy taqsimlash uchun xizmat qiladi. 2024-yildagi O'zbekiston tadqiqotlari ham masofadan zondlash va NDSI kabi indekslar yordamida sho'rlanish monitoringini kuchaytirish mumkinligini ko'rsatadi [10].

Shu bilan birga, modelni joriy etishda ma'lumotlar sifati muhim cheklov hisoblanadi. Sensorlarning kalibrlanishi, kuzatuv quduqlarining fazoviy zichligi, tuproq gidrofizik parametrlarining ishonchliligi va drenaj tarmoqlarining haqiqiy ish qobiliyati noto'g'ri bo'lsa, matematik modelning prognozi ham noaniq bo'ladi. Shuning uchun amaliy joriy etishda "model aniqligi" bilan bir qatorda "monitoring sifati" ham alohida boshqaruv mezonini sifatida olinishi kerak.

XULOSA. Sug'oriladigan agroekotizimlarning meliorativ holatini adaptiv boshqarish uchun suv-tuz almashinuvi va sizot suvlari rejimini yagona model tizimida birlashtirish maqsadga muvofiqdir. Richards tenglamasi tuproqdagi suv harakatini, adveksiya-dispersiya tenglamasi tuzlar migratsiyasini, yer osti suvlari modeli esa sizot suvlari sathi va oqimini ifodalash uchun matematik asos bo'la oladi.

Taklif etilgan adaptiv boshqaruv sikli dala monitoringi → modelni yangilash → prognoz → ssenariylarni optimallashtirish → sug'orish/drenaj qarori → qayta monitoring ketma-ketligi asosida ishlaydi. Bunday tizim meliorativ holatni faqat "sho'rlangan yoki sho'rlanmagan" tarzida qayd etishdan ko'ra, xavfni oldindan aniqlash va boshqaruv choralarini vaqtida o'zgartirish imkonini beradi.

O'zbekistonning qurg'oqchil va suv taqchilligi kuchayib borayotgan sug'oriladigan hududlarida ushbu yondashuvni GIS, masofadan zondlash va IoT sensorlari bilan integratsiya qilish kelgusidagi tadqiqotlarning muhim yo'nalishi hisoblanadi. Keyingi bosqichda modelni Qashqadaryo viloyatining tanlangan irrigatsiya massivida kalibrlash, dala ma'lumotlari bilan verifikatsiya qilish va



real boshqaruv ssenariylarining suv sarfi hamda sho'rlanishga ta'sirini miqdoriy baholash tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. FAO. Global status of salt-affected soils. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. ISBN 978-92-5-139307-9.
2. FAO. Country Profiles: Decision Support System Discussed to Support Land Degradation Neutrality in Uzbekistan. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2026.
3. Khasanov S., Li F., Kulmatov R., et al. Evaluation of the perennial spatio-temporal changes in the groundwater level and mineralization, and soil salinity in irrigated lands of arid zone: as an example of Syrdarya Province, Uzbekistan. *Agricultural Water Management*, 2022, 263, 107444. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107444.
4. Pan X., Wang W., Liu T., Bao A., Chen X., Akmalov S., De Maeyer P., Van de Voorde T. Modeling the effects of improved irrigation methods in a groundwater system: A case study from the Amu Darya Delta, Uzbekistan. *Journal of Hydrology*, 2023, 625(A), 129987. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129987.
5. Reading L., Lockington D. Assessing the factors controlling rising groundwater levels by combining agricultural modelling with reactive transport modelling. *Agricultural Water Management*, 2026, 331, 110440. DOI: 10.1016/j.agwat.2026.110440.
6. Kanzari S., Ben Nouna B., Ben Mariem S., Rezig M. Hydrus-1D model calibration and validation in various field conditions for simulating water flow and salts transport in a semi-arid region of Tunisia. *Sustainable Environment Research*, 2018, 28(6), 350–356. DOI: 10.1016/j.serj.2018.10.001.
7. Šimůnek J., van Genuchten M.Th., Šejna M. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat,



and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual / User Documentation. University of California Riverside / PC-Progress.

8. Langevin C.D., Thorne D.T. Jr., Dausman A.M., Sukop M.C., Guo W. SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 2012.

9. Ayers R.S., Westcot D.W. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1. Rome: FAO, 1994.

10. Jumaniyazov I., Juliev M., Khudaybergenov Y., et al. Analysis of soil salinity monitoring in irrigated areas (case of Shimbay district, Republic of Karakalpakstan). E3S Web of Conferences, 2024, 590, 01007. DOI: 10.1051/e3sconf/202459001007.

Izoh: 3-rasmdagi grafik metodikani tushuntirish uchun shartli, normallashtirilgan ssenariy asosida tuzilgan; u dala tajribasi natijasi sifatida talqin qilinmasligi kerak.

