

**“TOSHKENT IRRIGATSIYA VA QISHLOQ XO‘JALIGINI
MEXANIZATSIYALASH MUHANDISLARI INSTITUTI” MILLIY
TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.T.10.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**“TOSHKENT IRRIGATSIYA VA QISHLOQ XO‘JALIGINI
MEXANIZATSIYALASH MUHANDISLARI INSTITUTI”
MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI**

ESHBOYEV NAVRO‘Z PANJI O‘G‘LI

**SUG‘ORILADIGAN YERLARDA YER OSTI SUVLARI GIDRAVLIK
REJIMINI BAHOLASHDA GAT TEXNOLOGIYALARI VA MACHINE
LEARNING ALGORITMLARI**

05.09.07–Gidravlika va muhandislik gidrologiyasi

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent–2026

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Содержание автореферата диссертации доктора
философии (PhD) по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of
philosophy (PhD) on technical sciences**

Eshboyev Navro'z Panji o'g'li

Sug'oriladigan yerlarda yer osti suvlari gidravlik rejimini baholashda GAT
texnologiyalari va Machine learning algoritmlari..... 3

Эшбоев Навруз Панжи угли

Оценка гидравлического режима подземных вод на орошаемых землях с
использованием ГИС-технологий и алгоритмов Machine learning..... 21

Eshboev Navruz Panji ugli

Assessment of the hydraulic regime of groundwater in irrigated lands using
GIS technologies and Machine Learning algorithms..... 41

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 45

**“TOSHKENT IRRIGATSIYA VA QISHLOQ XO‘JALIGINI
MEXANIZATSIYALASH MUHANDISLARI INSTITUTI” MILLIY
TADQIQOT UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.T.10.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

**“TOSHKENT IRRIGATSIYA VA QISHLOQ XO‘JALIGINI
MEXANIZATSIYALASH MUHANDISLARI INSTITUTI”
MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI**

ESHBOYEV NAVRO‘Z PANJI O‘G‘LI

**SUG‘ORILADIGAN YERLARDA YER OSTI SUVLARI GIDRAVLIK
REJIMINI BAHOLASHDA GAT TEXNOLOGIYALARI VA MACHINE
LEARNING ALGORITMLARI**

05.09.07–Gidravlika va muhandislik gidrologiyasi

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent-2026

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2026.1.PhD/T6590 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya "Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" Milliy tadqiqot universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus va ingliz (rezyume)) ilmiy kengash veb-sahifasida (www.tiame.uz) va «Ziynet» axborot ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Arifjanov Aybek Muxamedjanovich
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Abdullayev Botirjon Dadajonovich
geologiya-mineralogiya fanlari doktori, professor

Abdulxayev Zohidjon Erkinjonovich
texnika fanlari falsafa doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Toshkent arxitektura-qurilish universiteti

Dissertatsiya himoyasi "Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" Milliy tadqiqot universiteti huzuridagi DSc.03/30.12.2019.T.10.02 raqamli ilmiy kengashning «16» 10 2026 yil soat 13⁰⁰ da majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100000, Toshkent sh, Qori Niyoziy ko'chasi, 39-uy. Tel: (99871) 237-22-67; Faks: (99871) 237-54-79, e-mail: admin@tiame.uz).

Dissertatsiya bilan "Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" Milliy tadqiqot universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 428 raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100000, Toshkent sh, Qori Niyoziy ko'chasi, 39-uy. Tel: (99871) 237-22-67, e-mail: admin@tiame.uz.

Dissertatsiya avtoreferati 2026 yil «29» 09 kuni tarqatildi.

(2026 yil «28» 09 da № 428 raqamli reyestr bayonnomasi).



M.X. Xamidov

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
raisi, t.f.d., professor

F.A. Gapparov

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
ilmiy kotibi, t.f.d., professor

D.R. Bazarov

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
huzuridagi ilmiy seminar raisi
o'rinbosari, t.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati. Jahonda sug'oriladigan yerlarda yer osti suvlarining gidravlik rejimini ilmiy asosda baholash, uning mavsumiy va hududiy o'zgarishlarini aniqlash hamda zamonaviy GAT texnologiyalari va Machine Learning algoritmlaridan foydalanish yetakchi o'rinlardan birini egallamoqda. Dunyo miqyosida sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlarining gidravlik rejimini GAT texnologiyalari asosida baholash, fazoviy ma'lumotlarni tahlil qilish, Machine Learning algoritmlari yordamida suv sathi va gidravlik ko'rsatkichlarni modellashtirish hamda ularning o'zgarishini prognozlash imkonini beruvchi zamonaviy yondashuvlarni amaliyotga joriy etishni taqozo etadi. Shu jihatdan sug'oriladigan yerlarda yer osti suvlarining gidravlik rejimini baholashda GAT texnologiyalari asosida fazoviy ma'lumotlarni tahlil qilish, Machine Learning algoritmlari yordamida gidrogeologik ko'rsatkichlarni modellashtirish va ularning o'zgarishini prognozlash muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda suv xo'jaligi rivojlanishiga ta'sir etuvchi katta hajmdagi ma'lumotlarni tezkor qayta ishlash, ishonchli tahlil qilish va prognozlash, shuningdek, yer osti suvlari gidravlik rejimini baholashda GAT texnologiyalari hamda sun'iy intellektga asoslangan Machine Learning algoritmlarini qo'llashga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, yer osti suvlari sathining o'zgarishini modellashtirish, xavf zonalarini ajratish, geoma'lumotlar va vaqt qatorlarini tahlil qilish, noaniqliklarni kamaytirish hamda prognoz aniqligini oshirishga qaratilgan GAT va Machine Learning asosidagi intellektual yondashuvlarni ishlab chiqish, shuningdek, yer osti suvlari gidravlik rejimini baholashning zamonaviy usullarini asoslashga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda suv resurslaridan oqilona va samarali foydalanish, sug'oriladigan yerlarda yer osti suvlari holatini muntazam monitoring qilish, ularning gidravlik rejimini baholash, suv xo'jaligini raqamlashtirish hamda zamonaviy GAT texnologiyalari va sun'iy intellekt algoritmlaridan foydalanish bo'yicha keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasini 2030 yilgacha rivojlantirish strategiyasida, jumladan, «...suv resurslaridan oqilona foydalanish, suvdan foydalanish samaradorligini oshirish, irrigatsiya tizimlarini modernizatsiya qilish, suv xo'jaligida raqamli va innovatsion texnologiyalarni keng joriy etish...»¹ bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarini amalga oshirishda, jumladan, sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlarining gidravlik rejimini GAT texnologiyalari asosida baholash, geoma'lumotlar va vaqt qatorlarini tahlil qilish, Machine Learning algoritmlari yordamida yer osti suvlari sathining o'zgarishini modellashtirish va prognozlash hamda suv resurslarini samarali boshqarishga qaratilgan zamonaviy ilmiy yondashuvlarni yaratish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 11-sentabrdagi

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 11-sentabrdagi PF-158-son "O'zbekiston–2030" strategiyasi to'g'risidagi Farmoni

“O‘zbekiston–2030” strategiyasi to‘g‘risidagi PF-158-son Farmoni, O‘zbekiston Respublikasining 2023-yil 4-avgustdagi “Suv kodeksini tasdiqlash to‘g‘risida”gi O‘RQ-1076-son Qonunida, 2023-yil 1-maydagi “Suv xo‘jaligini boshqarish tizimini takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-169-son qarori, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 7-dekabrda “Qishloq xo‘jaligi yerlarining meliorativ holatini yaxshilash va suv resurslaridan oqilona foydalanish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-408-son qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining V - «Qishloq xo‘jaligi, biotexnologiya, ekologiya va atrof-muhit muhofazasi» va VIII - «Yer to‘g‘risidagi fanlar (geologiya, geofizika, seysmologiya va mineral xomashyoni qayta ishlash» ustuvor yo‘nalishlari doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Yer osti suvlari harakatining nazariy asoslari va ularning hisoblash usullarini ishlab chiqish muammolari A.Darsi, J.Dyupi, L.S.Leybenzon, F.Forxgeymer, N.YE.Jukovskiy, J.Bussinesk, CH.Slixter, S.F.Averyanov, V.I.Aravina, N.N.Pavlovskiy, G.N.Kamenskiy, F.B.Abotaliyev, D.M.Kas, K.SH.Latipov, R.Sadullayev, D.F.Fayzullayev, N.Ravshanov, B.Xo‘jayorov, I.K.Gavich, T.W.Patzek, P.J.Monteiro, D.B.Silin, M.Chraibi, S.Zaleski, C.Atkinson, R.A.Isangulov, F.Franco, M.H.Hamdan va boshqa tadqiqotchilarning ishlarida bayon etilgan.

GAT texnologiyalarining suv resurslarini tadqiqotida qo‘llanilishi hamda machine learning va deep learning algoritmlaridan foydalanish masalalari R.Tomlinson, M.F.Gudchayld, P.A.Burrou, A.U.Frank, S.Openshou, D.J.Maguayr, M.Batti, G.Klark, N.Krisman, D.V.Rxind, Y.Lekun, Y.Benjio, J.Xinton, A.Greyvs, J.Shmidxuber, I.Gudfellou, T.Sejnovski, M.Jordan, P.Domingos, A.Ng, A.Arifjanov, Z.Abdulkhaev, A.Kadirkhodjaev, B.Akramov, B.Abdullaev, Z.Umarova va boshqa olimlar tomonidan izlanishlar olib borilgan va ma‘lum darajada ijobiy natijalarga erishilgan.

Olib borilgan ilmiy tadqiqotlar va ularning tahliliga ko‘ra, hozirgi vaqtda sug‘oriladigan yerlarda yer osti suvlari gidravlik rejimini baholash, GAT texnologiyalari asosida gidravlik parametrlarni fazoviy tahlil qilish hamda machine learning algoritmlarini qo‘llash bo‘yicha muayyan ilmiy-amaliy natijalarga erishilgan. Biroq yer osti suvlari gidravlik rejimini kompleks baholashda gruntlarning filtratsiya koeffitsientini aniqlash va hududiy zonalashtirish, gidravlik parametrlarning fazoviy o‘zgarishini baholash, shuningdek, gruntlarning fizik-mexanik xususiyatlarini Machine Learning algoritmlari asosida prognozlashni yagona yondashuv asosida tadqiq etish masalalari yetarlicha chuqur o‘rganilmagan.

Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta‘lim muassasasining ilmiy ishlari rejasi bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti “Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti” Milliy tadqiqot universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining 1.8-son “Irrigatsiya tizimlari, gidrotexnik inshootlar va suv omborlarida gidravlik va gidrologik jarayonlarni informatsion texnologiyalar asosida baholashning ilmiy

asoslarini ishlab chiqish”, “Iqlim o‘zgarishi sharoitida Xitoy va O‘zbekistonning suvni tejovchi texnologiyalarini qo‘llash va moslashtirish” mavzusidagi O‘zbekiston-Xitoy qo‘shma loyihasi (2025–2028) hamda Erasmus+ Yevropa Ittifoqi tomonidan moliyalashtirilgan “Oliy ta’limda salohiyatni oshirish” yo‘nalishidagi MECAS (Orol dengizi havzasiga ta’siri bo‘yicha ekoinformatika magistr ta’lim yo‘nalishini yaratish) mavzusidagi amaliy loyihasi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi. Yer osti suvlari gidravlik rejimini GAT texnologiyalari, machine learning va deep learning algoritmlarini qo‘llagan holda baholash va bashorat qilish usullarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqot vazifalari:

sug‘oriladigan yerlarda yer osti suvlari gidravlik rejimini baholashga doir nazariy va amaliy tadqiqotlar tahlili;

sug‘oriladigan yerlarda yer osti suvlari gidravlik rejimining shakllanishiga ta’sir etuvchi tabiiy va antropogen omillarni masofadan zondlash usullari yordamida tadqiq etish;

Machine learning va Deep learning algoritmlarini (LSTM neyron tarmog‘i) qo‘llagan holda yer osti suvlari sathi o‘zgarishini baholash va bashorat qilish bo‘yicha tadqiqotlar olib borish;

GAT texnologiyalari, Machine learning va Deep learning algoritmlarini integratsiyalash orqali yer osti suvlari gidravlik rejimini tahlil qilishning kompleks usulini ishlab chiqish.

Tadqiqotning obyekti sifatida Surxondaryo viloyati sug‘oriladigan yerlari olingan.

Tadqiqotning predmetini yer osti suvlari harakatining gidravlik va gidrologik jarayonlari tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida gidravlika va muhandislik gidrologiyasi usullaridan, dala tajriba ma’lumotlarini analitik qayta ishlash, eksperimental tajriba natijalariga statistik ishlov berish, machine learning va Deep learning algoritmlaridan, gidrogeodinamik modellashtirish usullaridan hamda dasturiy mahsulot ishlab chiqish maqsadida sun’iy intellekt, Python va JavaScript dasturlash tillaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

sug‘oriladigan yerlarda yer osti suvlari sathining ko‘p yillik hamda mavsumiy o‘zgarishiga ta’sir etuvchi tabiiy va antropogen omillarni inobatga olib oqimning barqaror va beqaror harakatining gidrodinamik modeli takomillashtirilgan;

gidravlik va gidrologik ma’lumotlar hamda sun’iy intellekt algoritmlarini integratsiyalash asosida yer osti suvlarining gidravlik rejimini baholash usuli ishlab chiqilgan;

LSTM (Long Short-Term Memory) neyron tarmoqlari yordamida yer osti suvlari dinamikasini bashoratlash modeli yaratilgan;

GAT texnologiyalari, machine learning va deep learning algoritmlarini integratsiyalash orqali yer osti suvlari gidravlik rejimini tahlil qilish usuli ishlab chiqilgan;

Tadqiqotning amaliy natijasi quyidagilardan iborat:

yer osti suvlari sathini monitoring qilish uchun “Groundwater Information Management System” onlayn ilovasi va ma’lumotlar bazasi yaratilgan;

yer osti suvlari sathi dinamikasini baholash va boshqarishni amalga oshirishni ta’minlovchi algoritmi (Python PL) va hisoblash web ilovasi hamda dasturi yaratilgan;

sug’oriladigan maydonlarda yer osti suvlari mavsumiy yo’nalishi va sathini ifodalovchi 2D xaritasi ishlab chiqilgan;

gruntlarning gorizontallik filtratsiya koeffitsiyenti bo’yicha zonalashtirish amalga oshirildi hamda xaritalari ishlab chiqilgan;

LSTM algoritmi yordamida yer osti suvlari sathi dinamikasini bashorat qilish modeli ishlab chiqilgan;

Masofadan zondlash usullari yordamida tadqiqot hududi uchun onlayn ilova yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. umume’tirof etilgan mexanika qonunlari, zamonaviy GAT texnologiyalari, Machine Learning va Deep Learning algoritmlariga asoslanganligi, nazariy natijalarning eksperimental va dala tajribalari natijalari bilan taqqoslab tekshirilganligi, shuningdek, statistik va matematik usullar asosida, jumladan o’rtacha kvadratik xatolik (MSE) ko’rsatkichi orqali baholanganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati yer osti suvlari gidravlik rejimini GAT texnologiyalari, Machine learning va Deep learning algoritmlari asosida baholash usullari takomillashtirilganligi, gruntlarning filtratsiya koeffitsiyenti va gidravlik parametrlarini fazoviy tahlil qilish yondashuvi ishlab chiqilganligi, shuningdek, LSTM neyron tarmog’i yordamida yer osti suvlari sathini bashorat qilish modeli yaratilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati yer osti suvlari gidravlik rejimini baholash va bashorat qilish uchun GAT asosidagi interaktiv xaritalar va modellar ishlab chiqilganligi, filtratsiya koeffitsiyenti bo’yicha hududlarni zonalashtirish hamda yer osti suvlari sathini nazorat qilish va boshqarishga xizmat qiluvchi algoritmi va dasturiy ta’minot yaratilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Sug’oriladigan yerlarda yer osti suvlari gidravlik rejimini baholashda GAT texnologiyalari va Machine learning algoritmlari mavzusi bo’yicha olingan natijalar asosida:

Yer osti suvlari sathi dinamikasini fazoviy tahlil qilish, gidrometeorologik va gidrogeologik ma’lumotlarni integratsiyalash hamda interaktiv xaritalar orqali vizualizatsiya qilish imkonini beruvchi “Groundwater Information Management System” monitoring tizimi ishlab chiqilgan va amaliyotga joriy qilingan (O’zbekiston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o’zgarishi vazirligining 2025-yil 17-dekabrda 03-03/1-3724-son ma’lumotnomasi). Tizim asosida 2000–2024-yillardagi ma’lumotlarni qamrab olgan “Gidrogeologik-gidromeliorativ ma’lumotlar bazasi (Surxondaryo viloyati misolida)” yaratilib, O’zbekiston Respublikasi Adliya vazirligining BGU-1674-son

guvohnomasi bilan ro'yxatdan o'tkazilgan. Natijada, yer osti suvlari sathining ko'p yillik va mavsumiy o'zgarishlarini monitoring qilish imkoniyati yaratilgan;

Yer osti suvlari sathi dinamikasini bashorat qilish uchun LSTM (Long Short-Term Memory) neyron tarmog'i asosidagi model ishlab chiqilgan va amaliyotga joriy qilingan (O'zbekiston Respublikasi Ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligining 2025-yil 17-dekabrdagi 03-03/1-3724-son ma'lumotnomasi). Natijada, yer osti suvlari sathini bashorat qilish aniqligi 92 foizni tashkil etib, uning ko'tarilishining oldini olish bo'yicha tadbirlarni oldindan rejalashtirish imkoniyati yaratilgan;

GAT texnologiyalari asosida ishlab chiqilgan onlayn platforma Surxondaryo viloyati Amu-Surxon irrigatsiya tizimlari havza boshqarmasi, "Chiroy Muzrabod" XK, Ekologiya va iqlim o'zgarishi milliy qo'mitasining hududiy boshqarmalari hamda Xalqaro suv resurslarini boshqarish instituti Markaziy Osiyo ofisi (IWMI-CA) tomonidan amalga oshirilayotgan CGIAR NEXUS Gains tashabbusining "Groundwater research" komponenti faoliyatiga joriy qilingan (IWMI-CANing 2025-yil 6-iyuldagi ICT/145/07-son ma'lumotnomasi). Natijada, yer osti suvlari sathi dinamikasini monitoring qilish va suv resurslarini boshqarish bo'yicha tezkor qarorlar qabul qilish imkoniyati yaratilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 3 ta xalqaro va 2 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarda muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 15 ta ilmiy ish chop etilgan. O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 9 ta maqola, Scopus ma'lumotlar bazasida indekslanuvchi konferensiya materiallari to'plamlarida 4 ta ilmiy ish hamda Q2 kvartill xoriijiy jurnallarda 2 ta maqola chop etilgan, shuningdek, 2 ta EHM dasturi uchun guvohnoma olingan.

Dissertatsiya tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 125 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obyekti va predmeti keltirib o'tilgan. Shu bilan bir qatorda tadqiqotlar olib borilgan uslublar, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, shuningdek, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati, hamda natijalarning amaliyotga joriy qilinishi, tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi, natijalarning e'lon qilinishi hamda dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiya ishining **"Yer osti suvlarining gidravlik rejimi tadqiqotiga doir nazariy va amaliy izlanishlar tahlili"** deb nomlangan **birinchi bobida**

sugʻoriladigan hududlarda yer osti suvlarining gidravlik rejimini oʻrganishga oid ilmiy-amaliy tadqiqotlarning analitik tahlil natijalari keltirilgan.

Birinchi navbatda, sugʻoriladigan hududlarda yer osti suvlarining gidravlik rejimini aniqlashga doir klassik yondashuvlar, ularning shakllanish qonuniyatlari hamda suv sathining oʻzgarishiga taʼsir etuvchi omillar tizimli ravishda koʻrib chiqilgan. Tadqiqotlar tahlili shuni koʻrsatadiki, yer osti suvlarining rejimi suv balansi elementlari, yaʼni sugʻorish suvlari, infiltratsiya jarayonlari, drenaj tizimlari, iqlim omillari hamda tuproq-gidrogeologik sharoitlar taʼsirida shakllanadi.

Yer osti suvlarining harakati va ularning nazariy asoslari Darcy qonuni hamda geofiltratsiya tenglamalari asosida tahlil qilinib, turli olimlar tomonidan olib borilgan fundamental va zamonaviy tadqiqotlar natijasida grunt suvlari sathi dinamikasi murakkab, koʻp omilli tizim ekanligi hamda jarayonni toʻliq baholash uchun sunʼiy intellekt elementlaridan foydalanish mumkinligi asoslangan. Tadqiqotlar yer osti suvlarining shakllanishi va oʻzgarishi tabiiy hamda antropogen omillar taʼsirida yuzaga kelishini koʻrsatadi. Ayniqsa, sugʻorish suvlari infiltratsiyasi hamda kanal va kollektor tizimlaridagi filtratsion yoʻqotishlar grunt suvlari sathining oshishiga asosiy sabab boʻlishi aniqlangan. Shu bilan birga, samarali drenaj tizimining mavjudligi yer osti suvlarining barqaror rejimini taʼminlashda muhim omil sifatida eʼtirof etiladi.

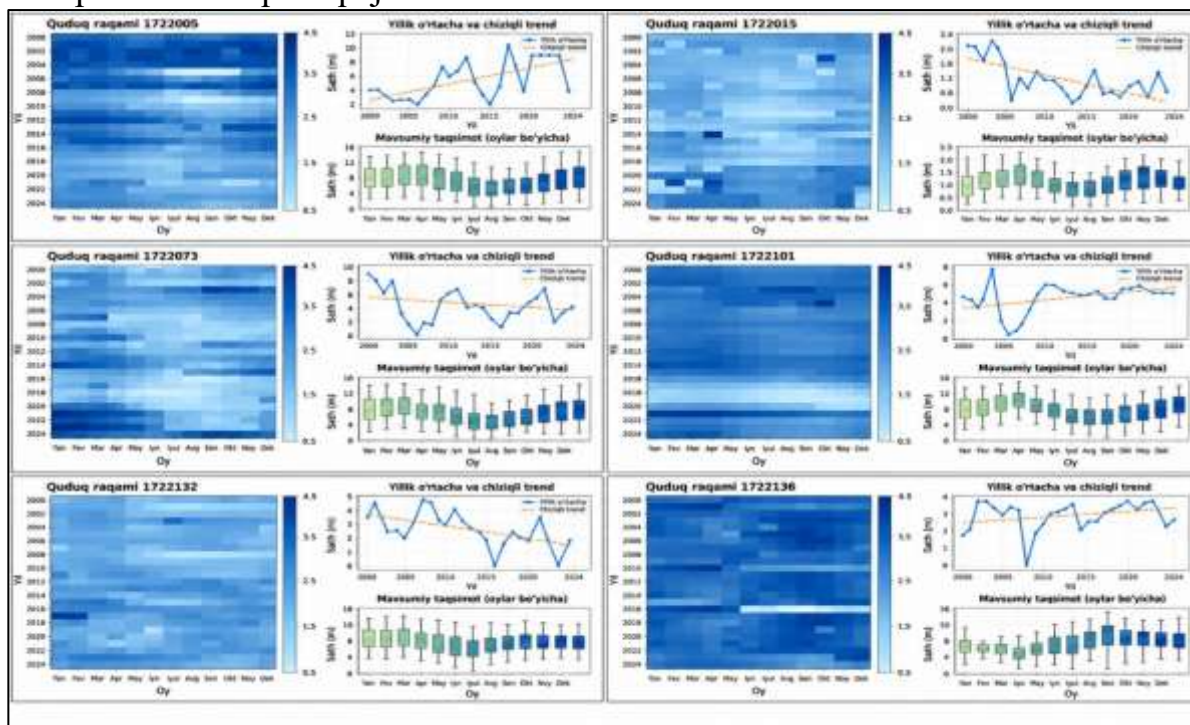
Hududiy tahlillar, xususan, Surxondaryo viloyati misolida olib borilgan izlanishlar yer osti suvlarining dinamikasi hududning gidrogeologik va iqlimiy xususiyatlariga bevosita bogʻliqligini tasdiqlaydi, bu esa har bir irrigatsiya hududi uchun individual boshqaruv yondashuvini talab qiladi. Zamonaviy ilmiy yondashuvlar doirasida Geografik axborot tizimlari, masofadan zondlash, Machine Learning va Deep Learning usullaridan foydalanish yer osti suvlari rejimini baholash va bashoratlash imkoniyatlarini kengaytiradi. Xususan, sunʼiy intellekt asosidagi neyron tarmoqlar va LSTM modellaridan foydalanish vaqt boʻyicha dinamik oʻzgarishlarni yuqori aniqlikda aniqlash imkonini berishi ilmiy tadqiqotlar bilan tasdiqlangan. GAT va ML/DL texnologiyalarining integratsiyasi esa yer osti suvlarini boshqarishning innovatsion va samarali mexanizmlarini shakllantirishga xizmat qiladi.

Olib borilgan izlanishlar asosida sugʻoriladigan hududlarda yer osti suvlarining gidravlik rejimini baholash va boshqarish masalasi kompleks yondashuvni, yaʼni nazariy asoslar, matematik modellashtirish va zamonaviy raqamli texnologiyalarni birgalikda qoʻllashni talab etishi aniqlangan. Natijada, dissertatsiya tadqiqotining maqsadi va asosiy vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiya ishining **“Sugʻoriladigan yerlarda yer osti suvlari gidravlik rejimini baholash boʻyicha dala tadqiqotlari va ularning tahlili”** deb nomlangan **ikkinchi bobida** tadqiqot hududining geografik oʻrni, iqlim va gidrologik sharoiti, yer osti suvlarining shakllanishi, sathi oʻzgarishi va gidravlik xususiyatlari, hududning geologik, geomorfologik, litologik va gidrogeologik sharoitlari hamda tuproq koʻrsatkichlari, masofadan zondlash materiallari asosida olingan natijalar tahlili keltirilgan.

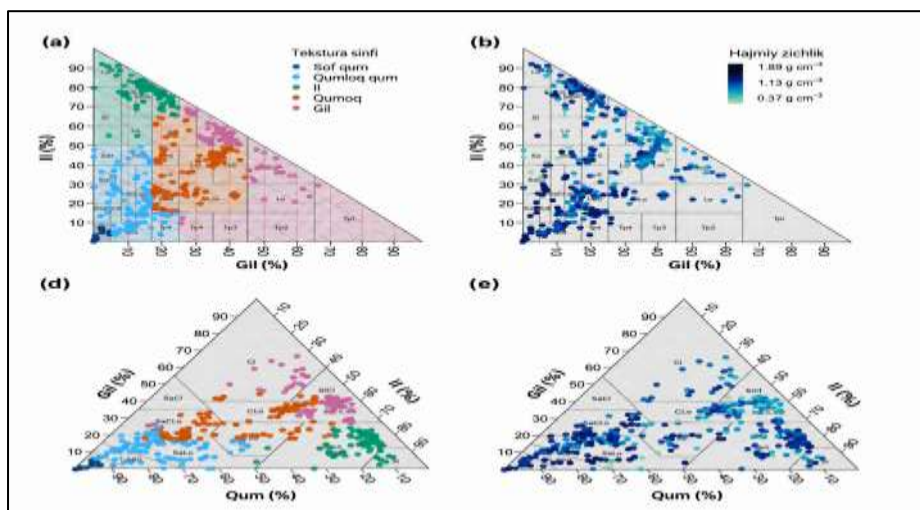
Tadqiqot obʼekti sifatida Surxondaryo viloyati sugʻoriladigan yerlari tanlab olindi. Yer osti suvlari rejimini baholash uchun 2000–2024-yillar boʻyicha 81 ta

kuzatuv qudug‘i ma’lumotlari jamlanib, ulardan rejimning turli tiplarini ifodalovchi 6 ta reprezentativ quduq ajratildi.



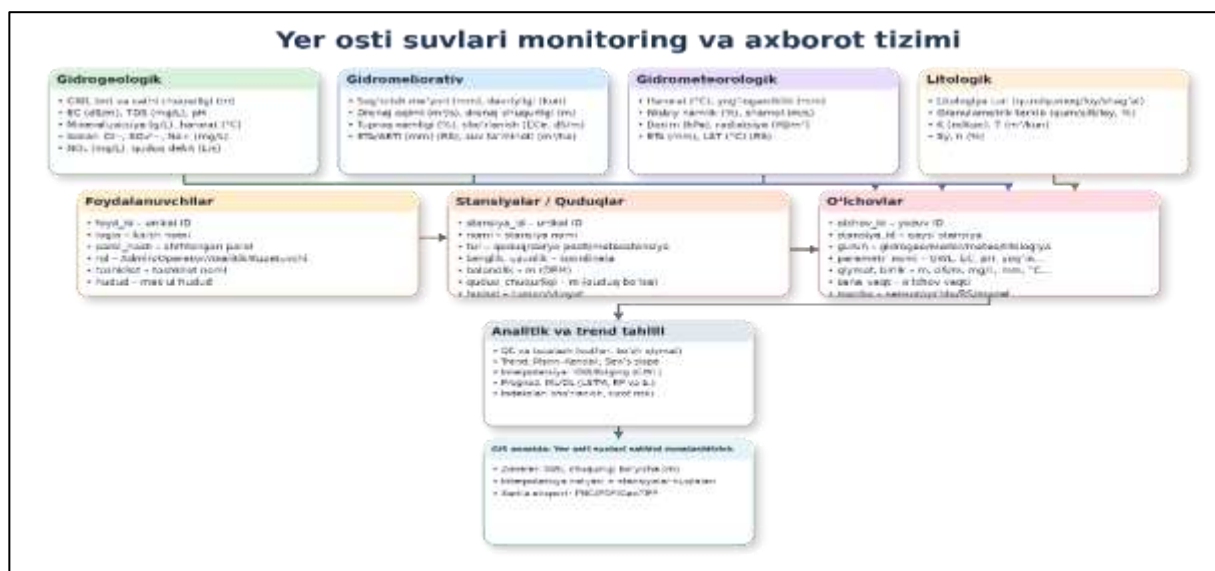
1-rasm. Yer osti suvlari sathi dinamikasi

Tahlillar natijasida tanlangan quduqlarda yer osti suvlari sathining oylik o‘rtacha chuqurligi 0,72 m dan 10,8 m gacha o‘zgarishi aniqlandi (1-rasm). Xususan, 1722005-sonli quduqda ko‘p yillik trend $+0,11$ m/yil ni tashkil etib, Mann–Kendall testi bo‘yicha $p=0,004$ darajada statistik ahamiyatli ekani isbotlandi; bu ayrim hududlarda yer osti suvlari sathi barqaror ko‘tarilish tendensiyasiga ega ekanini ko‘rsatadi. Meteorologik omillar tahlili asosida, Denov stansiyasida 2000–2024-yillar uchun yillik yog‘in o‘rtachasi 312,8 mm, aridlik indeksi 0,31 bo‘lib, hudud yarim qurg‘oq zona sifatida tavsiflandi; Termez stansiyasida esa yillik yog‘in 154,6 mm, aridlik indeksi 0,14 bo‘lib, qurg‘oq sharoit ustunligi aniqlandi. Trend tahliliga ko‘ra, yog‘in qatorlarida statistik jihatdan barqaror o‘sinh kuzatilmagan bo‘lsa-da, harorat bo‘yicha Termezda $+0,40$ °C/10 yil va Sherobodda $+0,53$ °C/10 yil ijobiy trend qayd etildi. Surxondaryo havzasi bo‘yicha so‘nggi 25 yillik ma’lumotlar tahliliga ko‘ra yog‘ingarchilik miqdori 41 mm ga kamayganligi aniqlandi. Tadqiqot hududi bo‘yicha tuproqlarning mexanik xossalari tahliliga ko‘ra, filtratsiya koeffitsienti (K) ning eng kichik qiymati 8,22 sm/kun, eng katta qiymati 12,03 m/kun, hudud bo‘yicha o‘rtacha qiymati esa 304,5 sm/kun ni tashkil etdi. G‘ovakligi (n) bo‘yicha qiymatlar 32 % dan 49 % gacha o‘zgarib, o‘rtacha 37,16 % ga teng bo‘ldi. Suv beruvchanligi (S_y) ning minimal qiymati 5 %, maksimal qiymati 32 %, o‘rtacha qiymati 24,1 % ni tashkil etdi. Dala namlik sig‘imi (θ_{fc}) bo‘yicha diapazon 8,2 mm dan 43,2 mm gacha bo‘lib, hududiy o‘rtacha qiymat 19,3 mm deb aniqlandi.



2-rasm. Tuproqlarning mexanik xossalari

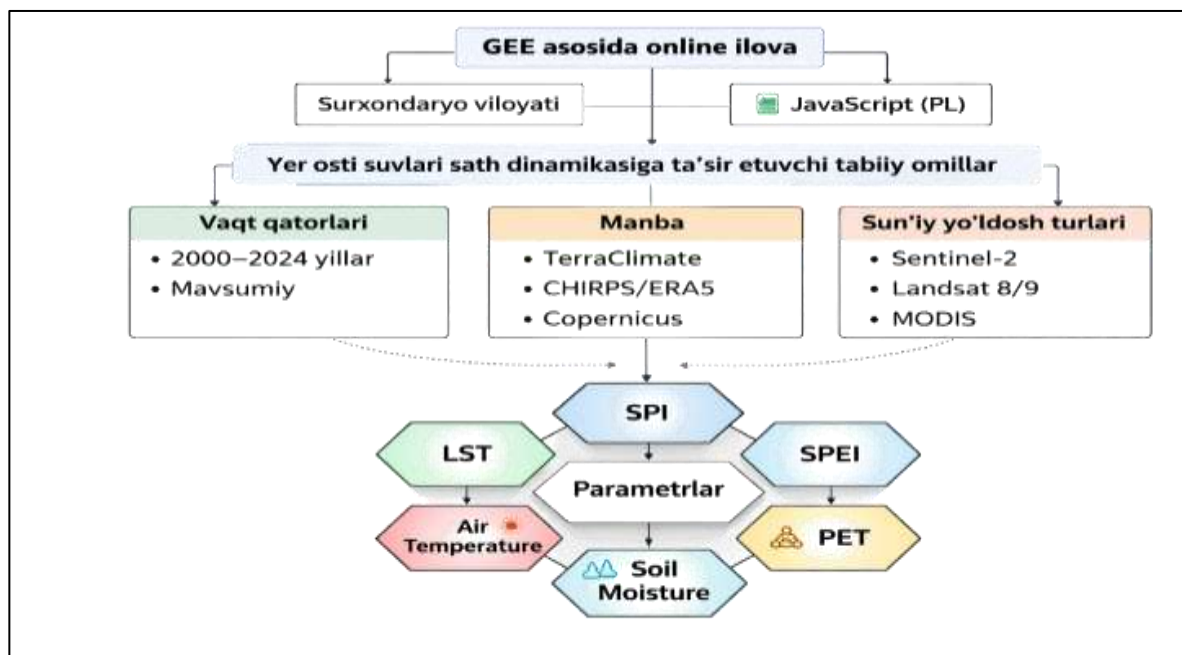
Hajmiy zichligi (ρ_b) esa 1,27 g/sm³ dan 1,55 g/sm³ gacha oʻzgarib, oʻrtacha 1,47 g/sm³ ni tashkil etdi (2-rasm). Koʻrsatkichlar hududda qumli, qumoq va gilli qatlamlarning bir-biri bilan almashinib kelishini, yaʼni tuproq qoplaminig kuchli teksturaviy va gidravlik geterogenligini koʻrsatadi. Shu bilan birga, tekstura sinfi boʻyicha oʻrtacha parametrlar ham sezilarli farq qildi: Soz (clay) tuproq sinfigida $K = 8,22$ sm/kun, $\theta_{fc} = 43,2$ mm, $S_y = 5$ %, $n = 49$ %, $\rho_b = 1,27$ g/sm³; ogʻir qumoq (clay loam) da $K = 24,5$ sm/kun, $\theta_{fc} = 28,7$ mm, $S_y = 13$ %, $n = 32$ %, $\rho_b = 1,53$ g/sm³; oʻrtacha qumoq (loam) da esa $K = 66,5$ sm/kun, $\theta_{fc} = 25,4$ mm, $S_y = 17$ %, $n = 43,3$ %, $\rho_b = 1,39$ g/sm³ ni tashkil etishi aniqlandi.



3-rasm. Yer osti suvlari monitoring va axborot tizimi tuzilishi

Tadqiqot doirasida yer osti suvlari monitoringi va axborot tizimi ishlab chiqilgan boʻlib, u turli manbalardan olingan maʼlumotlarni yagona platformaga birlashtirish, ularni standartlashtirish, yigʻish, statistik va fazoviy tahlil qilish hamda natijalarni xaritalar koʻrinishida taqdim etish imkonini beradi. Ushbu tizim yer osti suvlari rejimini kompleks baholash va bashoratlash uchun samarali vosita sifatida tavsiflangan. Masofadan zondlash texnologiyalari asosida hududning fazoviy

xaritalari tuzilib, yer osti suvlari sathi dinamikasini baholashda ko‘p manbali va analitik yondashuv qo‘llanilgan. Bu esa tabiiy omillar ta‘sirini aniqlash, monitoring tizimini takomillashtirish va bashoratlash modellarining aniqligini oshirish imkonini beradi.



4-rasm. Tadqiqot hududi uchun GEE asosida online ilovaning metodik sxemasi

Yuqoridagi tahlillar natijasida yer osti suvlari rejimini baholash va boshqarish uchun kompleks yondashuv zarurligi, ya‘ni dala kuzatuvlari, statistik tahlil, GAT texnologiyalari va zamonaviy modellashtirish usullarini birgalikda qo‘llash muhimligi asoslab berilgan.

Dissertatsiyaning **“GAT texnologiyalari, Machine learning va Deep learning algoritmlari yordamida yer osti suvlarining dinamikasini modellashtirish”** nomli **uchinchi bobida** yer osti suvlari sathini baholashda geografik axborot texnologiyalari, Machine learning algoritmlaridan foydalanib, yer osti suvlarining dinamikasini bashoratlash usulini takomillashtirish, Deep learning (LSTM) neyron tarmog‘i asosida yer osti suvlarining darajalarini bashorat qilish usulini ishlab chiqish masalalari bayon etilgan hamda modellar samaradorligini baholash va natijalarni taqqoslash ishlari amalga oshirilgan.

Yer osti suvlari harakati tenglamasi yer osti gruntlarining gorizont va vertikal filtratsiya koeffitsiyentlarini hisobga olgan holda Dekart koordinatalar sistemasida quyidagicha yoziladi:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R(t) - Q(t) \quad (1)$$

bu yerda, S_y - suv beruvchanlik koeffitsiyenti, h - yer osti suvlari sathi, K_x , K_y , K_z - mos ravishda x , y va z yo‘nalishlari bo‘yicha filtratsiya koeffitsiyentlari, $R_{(t)}$ - kiruvchi suv miqdori, $Q_{(t)}$ esa chiquvchi suv miqdorini bildiradi. Mazkur tenglama yer osti suvlari oqimining umumiy filtratsion harakatini ifodalaydi. Unda suv sathining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi gorizont va vertikal yo‘nalishlardagi filtratsiya jarayonlari, shuningdek, tashqi kirim va chiqimlar ta‘sirida shakllanishi ko‘rsatilgan.

Shu sababli tenglama yer osti suvlari sathining fazo va vaqt bo'yicha o'zgarishini gidravlik jihatdan asoslash uchun boshlang'ich nazariy ifoda sifatida qabul qilindi.

Sug'oriladigan hududlarda gidrologik parametrlar K_x, K_y, K_z kabi gidrologik parametrlar va Q_r, P, I, D balans komponentlari fazo-vaqt bo'yicha o'zgaruvchan bo'lib, ularni har bir (x, y, t) nuqtada to'liq o'lchash amaliy jihatdan murakkabdir. Shu sababli (1)-tenglamadagi fizik jarayonlarni ma'lumotlar asosida ifodalash uchun vaqt qatorlari bilan ishlashga mos bo'lgan LSTM (Long Short-Term Memory) neyron tarmog'i tanlandi. LSTM sug'orish mavsumidagi kechikkan ta'sirlarni, filtratsiya jarayonining inertiyligini va mavsumiy tebranishlarni xotira mexanizmi orqali hisobga olishi bilan ajralib turadi. Yuqorida keltirilgan (1)-tenglama asosida yer osti suvlari harakati suv balansi komponentlari orqali aniqlashtirilib, quyidagi ko'rinishga keltirildi:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q_r(t) + P(t) + I(t) - D(t) \quad (2)$$

bu yerda, $Q_r(t)$ - yonlama yoki gidrogeologik kirimni, $P(t)$ - atmosfera yog'inlari va yer yuzasidan shakllanadigan tabiiy kirimni, $I(t)$ - sug'orish suvlari infiltratsiyasini, $D(t)$ esa drenaj orqali chiqariladigan suv miqdorini bildiradi. Tenglamaning moslashtirilgan ko'rinishida hudud uchun asosiy kirim va chiqim komponentlari alohida ajratib ko'rsatilgan. Mazkur ifoda yer osti suvlari sathining o'zgarishi faqat filtratsiya koeffitsiyentlari bilan emas, balki hududiy suv balansi elementlari bilan ham bog'liqligini ko'rsatadi.

Ushbu tenglama tadqiqot hududi sharoitiga moslashtirilgan bo'lib, sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlari balansini soddalashtirilgan gidravlik ko'rinishda ifodalaydi. Unda kirimlar $Q_r(t)$, $P(t)$, $I(t)$ hamda chiqim $D(t)$ hisobga olinib, suv sathining o'zgarishi shu komponentlar va filtratsiya jarayonlarining birgalikdagi ta'siri natijasida shakllanishi asoslandi.

$$f_{S_y}(X_t) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(f_{K_x}(X_t) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(f_{K_y}(X_t) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + f_{Q_r}(X_t) + f_P(X_t) + f_I(X_t) - f_D(X_t) \quad (3)$$

bu yerda, $f_{S_y}(X_t)$ - suv beruvchanlikning hudud bo'yicha o'zgarishini, $f_{K_x}(X_t)$ va $f_{K_y}(X_t)$ - x va y yo'nalishlaridagi filtratsiya koeffitsiyentlarining fazoviy taqsimotini bildiradi. $f_{Q_r}(X_t)$, $f_P(X_t)$ va $f_I(X_t)$ mos ravishda yonlama kirim, yog'inlar hamda sug'orish infiltratsiyasi ta'sirini, $f_D(X_t)$ esa drenaj chiqimini ifodalaydi. Umumlashtirilgan model ko'rinishida parametrlarning fazoviy o'zgaruvchanligi funksional shaklda ifodalandi. Shu orqali parametrlarning bir xil qiymatga ega emasligi va ular hududiy sharoitga qarab o'zgarishi modelda hisobga olindi.

$$\hat{S}_y(t) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\hat{K}_x(t) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\hat{K}_y(t) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \hat{Q}_r(t) + \hat{P}(t) + \hat{I}(t) - \hat{D}(t) \quad (4)$$

(4)-tenglamada parametrlarning vaqt bo'yicha o'zgaruvchanligi inobatga olinib, tizimning dinamik xususiyatlari yanada aniqlashtirildi. Bu bosqichda fazoviy funksiyalar vaqtga bog'liq o'zgaruvchi parametrlar sifatida qaraldi va yer osti

suvlari sathining keyingi holatini baholash uchun tenglama diskret ko‘rinishga keltirildi:

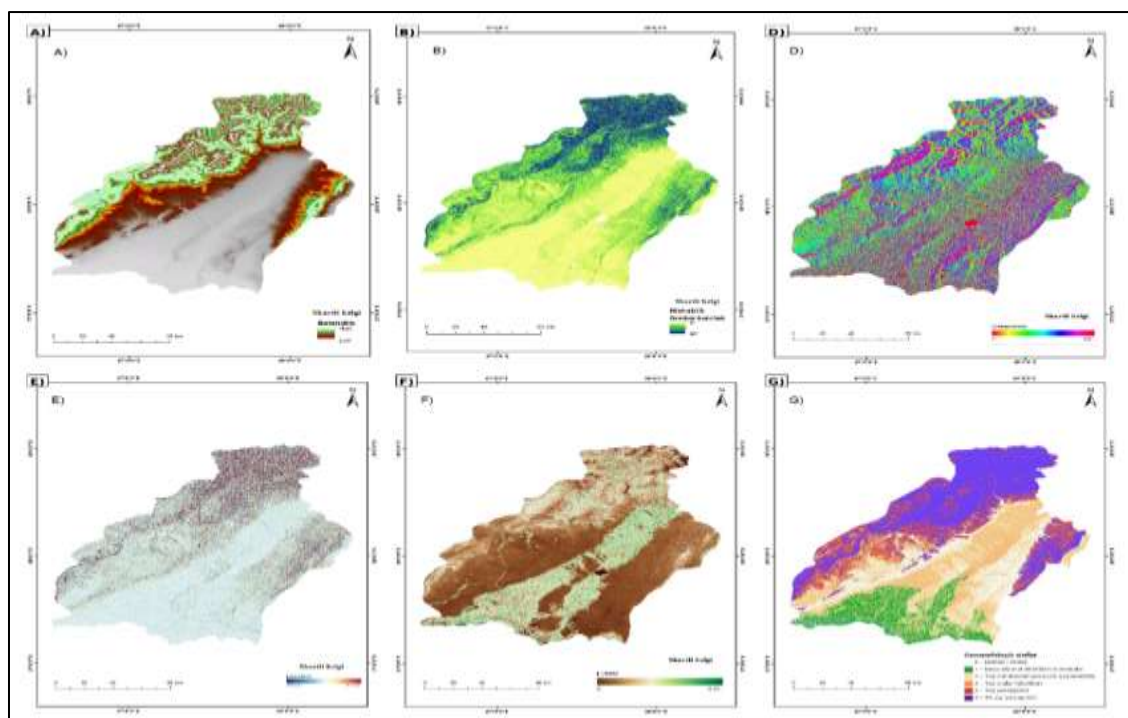
$$\hat{h}_{t+1} = h_t + \frac{\Delta t}{S_y(t)} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(t) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(t) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q_r(t) + P(t) + I(t) - D(t) \right] \quad (5)$$

bu yerda, $\hat{h}_{(t+1)}$ - keyingi vaqt momenti uchun bashorat qilingan yer osti suvlari sathi, $h_{(t)}$ - joriy vaqt momentidagi suv sathi, Δt - vaqt qadami, $S_{y(t)}$ - vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchi suv beruvchanlik koeffitsiyenti, $K_{x(t)}$ va $K_{y(t)}$ - mos ravishda x va y yo‘nalishlaridagi filtratsiya koeffitsiyentlari, $Q_{r(t)}$, $P_{(t)}$, $I_{(t)}$ - kirim komponentlari, $D_{(t)}$ esa drenaj orqali chiqim komponentini bildiradi. Modelning vaqt bo‘yicha diskretlashtirilgan ko‘rinishida suv sathining keyingi qiymati oldingi holat va shu vaqt oralig‘idagi gidravlik omillar asosida aniqlanadi. Mazkur ko‘rinish suv sathining o‘zgarishini oldingi holat, filtratsiya va suv balansi elementlari bilan bog‘lab hisoblash imkonini beradi.

$$\hat{h}_t = LSTM_{\theta}(X_{t-p:t-1}) \quad (6)$$

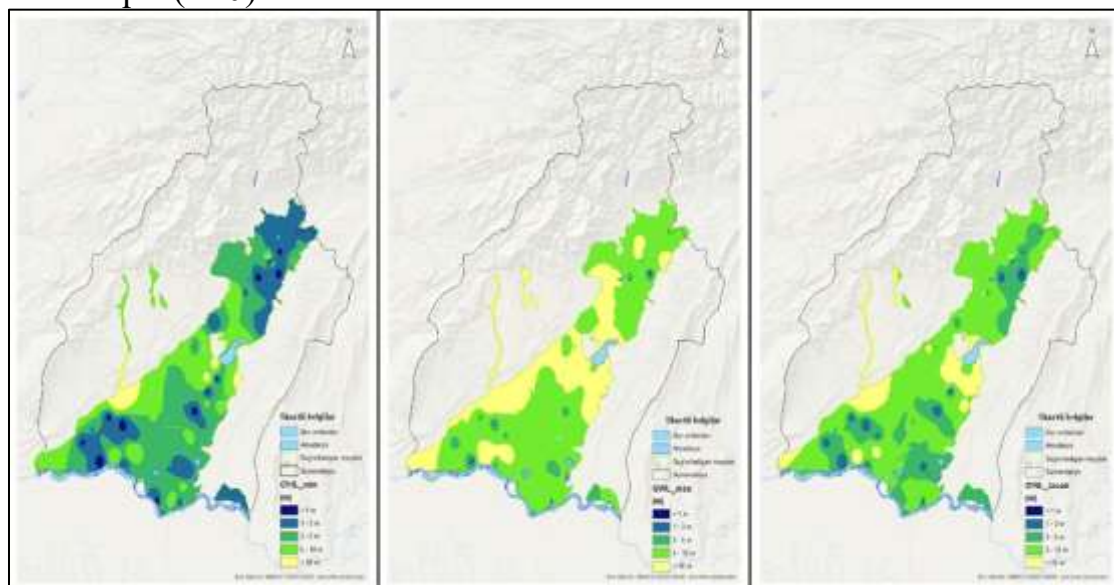
Ushbu ifoda LSTM asosidagi yakuniy bashorat modelini bildiradi. Unda $\hat{h}_{(t)}$ qiymati $X_{t-p:t-1}$ ko‘rinishidagi oldingi vaqt oralig‘i ma’lumotlari asosida aniqlanadi. X tarkibiga yer osti suvlari sathi bilan bog‘liq gidravlik va gidrogeologik omillar, jumladan filtratsiya koeffitsiyentlari, suv beruvchanlik, yog‘in, sug‘orish infiltratsiyasi, yonlama kirim va drenaj chiqimi kabi ko‘rsatkichlar kiritiladi. Shu sababli LSTM modeli fizik tenglamalarda ifodalangan jarayonlarni vaqt qatori ma’lumotlari orqali o‘rganib, yer osti suvlari sathining keyingi holatini bashoratlashga xizmat qiladi.

Sug‘oriladigan hududlarda yer osti suvlari rejimini GAT texnologiyalari, ko‘p mezonli baholash, geostatistik tahlil hamda machine learning va deep learning algoritmlari asosida modellashtirish natijalari keltirilgan. Dastlab tadqiqot hududi bo‘yicha relyef, nishablik, ekspozitsiya, drenaj zichligi, geomorfologiya, yer qoplam, NDVI, lineament zichligi va litologiya kabi fazoviy omillar raqamli qatlamlar ko‘rinishida tayyorlanib, ular AHP asosida normallashtirildi va weighted overlay (WO) usuli orqali yer osti suvlari potensial hamda xavf zonalari aniqlandi. Ushbu metodik yondashuvda baholash mezonlari 1–9 ballik shkala bo‘yicha reklassifikatsiya qilinib, modelning ishonchliligi $CR \leq 0.10$ sharti bilan tasdiqlandi. Hisoblashlar natijasida yer osti suvlari shakllanishiga eng katta ta’sir ko‘rsatuvchi omillar litologiya - 18.5%, lineament zichligi - 17.3% va geomorfologiya - 14.2% ekani aniqlandi, bu esa Surxondaryo viloyati sharoitida yer osti suvlari rejimi, birinchi navbatda, hududning geologik tuzilishi va morfostruktur xususiyatlari bilan belgilanayotganini ko‘rsatdi (5-rasm).



5-rasm. Surxondaryo hududining morfometrik va geomorfologik xaritalari: (A) Balandlik xaritasi, (B) Nishablik, (D) Ekspozitsiya, (E) Egrilik, (F) NDVI, (G) Geomorfologik sinflar

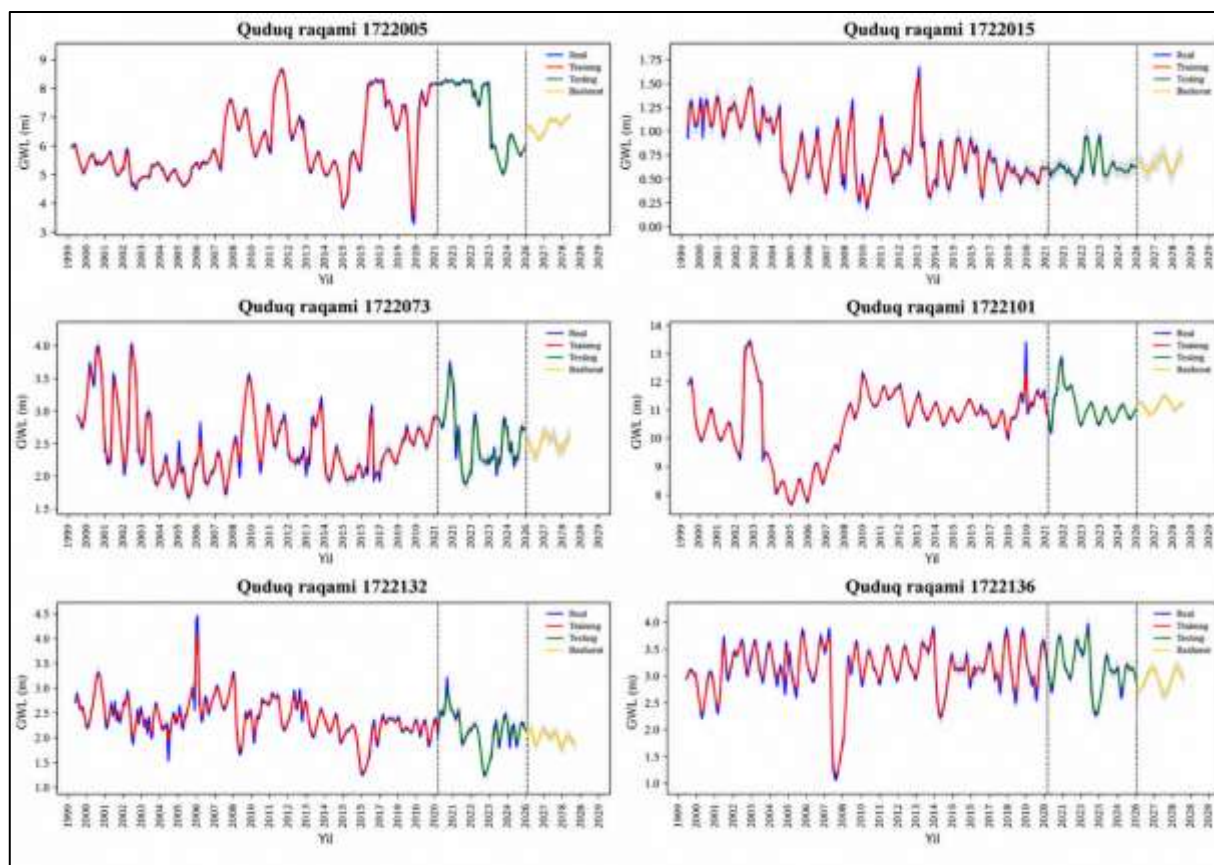
Fazoviy modellashirish natijasida yer osti suvlari sathining o‘rtacha, minimal va maksimal chuqurlik xaritalari tuzildi. Mazkur xaritalarda asosiy chuqurlik diapazonlari < 1 m, 1–3 m, 3–5 m, 5–10 m va > 10 m toifalarda ajratildi. (6-rasm). Shuningdek bazaviy va 2024-yil holat bo‘yicha xavf zonalari xaritalari ishlab chiqilib, ular juda sayoz (<1), sayoz (1-3), o‘rtacha chuqurlikda (3-5), chuqur (5-10) va juda chuqur (>10) sinflarida baholandi.



6-rasm. Tadqiqot hududida yer osti suvlari sathining minimal, maksimal va o‘rtacha qiymatlari xaritalari

Bunda yer osti suvlari chuqurligi 1 m dan kichik bo‘lgan hududlar yuqori meliorativ xavf zonalari sifatida ajratildi. Olingan natijalar hududda meliorativ

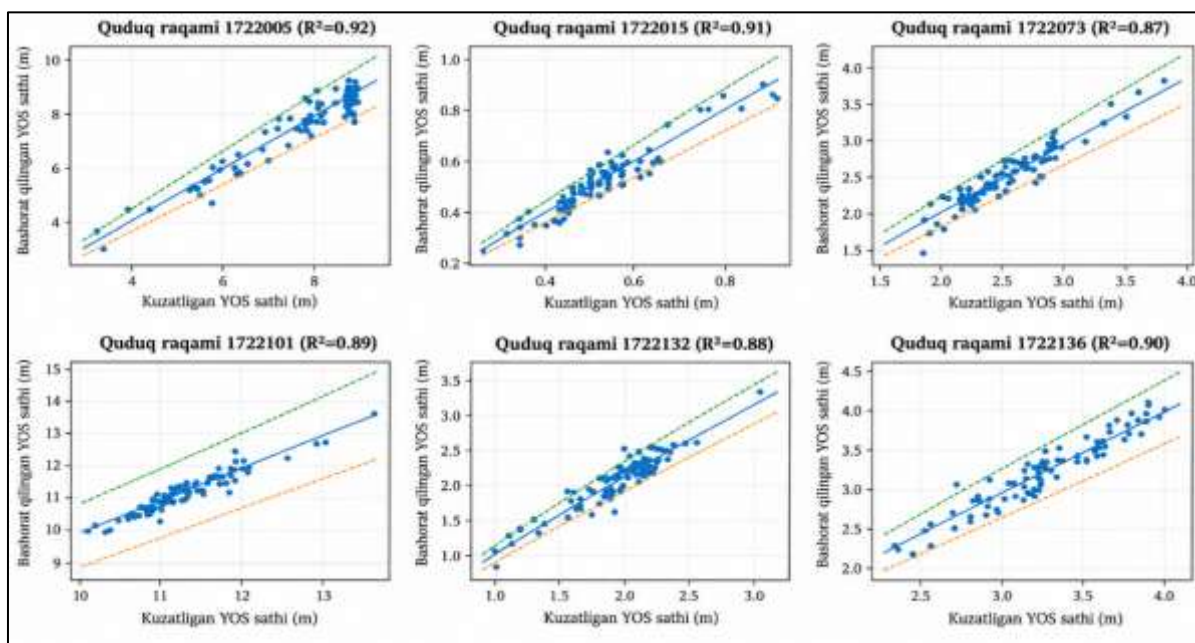
xavfning bir xil emasligini, ayrim massivlarda yer osti suvlari sathi ko'tarilish xavfi yuqori, ayrim zonalarda esa nisbatan barqaror holat saqlanishini ko'rsatdi.



7-rasm. Namunaviy kuzatuv quduqlari bo'yicha kuzatilgan va LSTM modeli yordamida bashorat qilingan yer osti suvlari sathi dinamikasi

Machine Learning bosqichida yer osti suvlari sathini bashoratlash uchun RF, SVM, XGBoost va LSTM modellarining qiyosiy tahlili bajarildi. Natijalarga ko'ra, 6 ta quduq bo'yicha eng yuqori aniqlik LSTM modelida kuzatildi: bunda $R^2 = 0.87-0.92$ oralig'ida bo'lib, RF modelida 0.61–0.66, SVM modelida 0.59–0.64, XGBoost modelida esa 0.64–0.69 qiymatlar olindi. LSTM uchun ayrim quduqlarda xatolik ko'rsatkichlari ham past bo'lib, masalan 1722005 quduqda $RMSE = 0.50$, $MAE = 0.32$, 1722016 quduqda $RMSE = 0.49$, $MAE = 0.31$, 1722136 quduqda esa $RMSE = 0.52$, $MAE = 0.33$ ni tashkil etdi. Bu holat LSTM modelining sug'orish mavsumidagi kechikkan ta'sirlar, drenaj inertligi va mavsumiy tebranishlarni xotira mexanizmi orqali samarali ushlashini ko'rsatdi. Bu natijalar LSTM modelining vaqt qatorlaridagi yashirin bog'liqliklar, mavsumiy tebranishlar va kechikkan ta'sirlarni boshqa modellarga nisbatan aniqroq aks ettirishini ko'rsatadi. Modellar samaradorligini baholash natijasida GAT, statistik tahlil va LSTM modelini o'zaro integratsiyalash yer osti suvlari rejimini baholashda eng maqbul yondashuv ekanligi isbotlandi (8-rasm). Geostatistik interpolatsiya usullari - xususan, IDW quduq kuzatuvlarini uzluksiz fazoviy yuzalarga aylantirishda samarali bo'ldi, LSTM esa vaqt qatorlari uchun eng ishonchli prognoz model sifatida ajralib chiqdi. Shu asosda yer osti suvlari sathining oldindan bashorat qilish aniqligi 92 % gacha yetkazildi. Mazkur natijalar amaliy jihatdan yer osti suvlari sathi ko'tarilish xavfini erta

aniqlash va suv resurslarini boshqarish bo'yicha qarorlarni ilmiy asoslash imkoniyati yaratildi.



8-rasm. LSTM modeli yordamida bashorat qilingan va kuzatilgan yer osti suvlari sathlarining taqqoslanishi

Dissertatsiya ishining “**Sug‘oriladigan hududlarda yer osti suvlarining gidravlik rejimini boshqarish bo‘yicha tavsiyalar**” deb nomlangan to‘rtinchi bobida tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy etish, yer osti suvlari rejimini boshqarish bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqish hamda monitoring va prognozlashning raqamli infratuzilmasini yaratish masalalari yoritilgan. Olingan ilmiy natijalar asosida yer osti suvlari sathi, gidrometeorologik ko‘rsatkichlar, gidrologik ma’lumotlar, suv-retensiya va gidravlik parametrlarni yagona tizimga birlashtiruvchi “Groundwater Information Management System” (GWIMS) ishlab chiqildi. Ushbu tizim Surxondaryo viloyati sug‘oriladigan hududlarida 2000–2024 yillar davomida kuzatilgan ma’lumotlar asosida shakllantirilgan “Gidrogeologik-gidromeliorativ ma’lumotlar bazasi” bilan integratsiyalandi va u O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi tomonidan BGU-1674-sonli guvohnoma bilan ro‘yxatdan o‘tkazildi. Natijada yer osti suvlari sathining ko‘p yillik va mavsumiy o‘zgarishlarini monitoring qilish, tezkor tahlil qilish va hududiy baholash imkoniyati yaratildi.

Ishlab chiqilgan LSTM asosidagi bashoratlash modeli amaliyotga joriy etilib, sug‘oriladigan hududlarda yer osti suvlari sathi dinamikasini oldindan baholashda 92% aniqlik ko‘rsatgani tasdiqlandi. Bu natija sizot suvlari sathi ko‘tarilishi xavfi mavjud hududlarda meliorativ tadbirlarni, xususan, drenaj yuklamasini kuchaytirish, monitoring zichligini oshirish va sug‘orish rejimlarini qayta ko‘rib chiqishni oldindan rejalashtirish imkonini berdi. Shu tariqa, bashoratlash modeli nafaqat nazariy jihatdan yuqori aniqlikka ega bo‘ldi, balki amaliy boshqaruv qarorlarini qabul qilish vositasiga aylandi.

GAT texnologiyalari asosida yaratilgan bulutli onlayn platforma orqali yer osti suvlari sathi, meteorologik ko‘rsatkichlar va gidrologik ma’lumotlarni yagona

muhitda tahlil qilish va hududiy vizualizatsiya qilish imkoniyati yaratildi. Mazkur platforma O'zbekiston Respublikasi Suv xo'jaligi vazirligi tizimidagi Surxondaryo viloyati Amu-Surxon irrigatsiya tizimlari havza boshqarmasi, "O'zbekgidrogeologiya" DUK, "Chiroy Muzrabod" XK hamda O'zbekiston Respublikasi Ekologiya va iqlim o'zgarishi milliy qo'mitasi hududiy boshqarmalari faoliyatida joriy qilindi. Buning natijasida yer osti suvlari rejimini monitoring qilish, risk zonalarini operativ ajratish, gidromeliorativ jarayonlarni baholash va hududiy boshqaruv choralari tanlash imkoniyati amaliyotga tatbiq etildi.

To'rtinchi bobda ishlab chiqilgan tavsiyalar shuni ko'rsatdiki, gruntlarning filtratsiya koeffitsiyenti past, dala nam sig'imi yuqori va sizot suvlari sathi sayoz joylashgan hududlarda drenaj tadbirlarini ustuvor kuchaytirish lozim. Aksincha, yuqori K va past θ_{fc} bilan tavsiflanuvchi qumli massivlarda infiltratsiya tezligi yuqori bo'lgani sababli monitoring rejimini kuchaytirish va sug'orish yuklamasini differensial boshqarish muhim hisoblanadi. Shu jihatdan, gruntlarning fizik va mexanik parametrlari asosida hududiy tavsiyalar ishlab chiqilishi meliorativ boshqaruv samaradorligini oshirishga xizmat qiladi. Mazkur bob natijalari ishlab chiqilgan metodika, modellar, algoritmlar va GWIMS tizimi sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlari rejimini kuzatish–baholash–xaritalash–bashoratlash–boshqarish zanjiri asosida yuritish imkonini berishini ko'rsatdi. Bu esa suv resurslaridan oqilona foydalanish, sho'rlanish va botqoqlanish xavfini kamaytirish, sug'orish va drenaj tadbirlarini hududiy optimallashtirish uchun muhim ilmiy-amaliy asos yaratadi.

XULOSA

"Sug'oriladigan yerlarda yer osti suvlari gidravlik rejimini baholashda GAT texnologiyalari va Machine learning algoritmlari" mavzusidagi falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi xulosalar taqdim etiladi:

1. Sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlari gidravlik rejimini baholashning ilmiy-uslubiy asoslari takomillashtirildi; bunda an'anaviy gidrogeologik kuzatuvlar GAT texnologiyalari, masofadan zondlash ma'lumotlari hamda machine learning algoritmlari bilan uyg'unlashtirilib, yer osti suvlari sathining fazoviy-vaqtinchalik o'zgarishini kompleks tahlil qilish imkonini beruvchi yondashuv ishlab chiqilgan.

2. Yer osti suvlari rejimining ko'p yillik monitoringi 81 ta kuzatuv qudug'i bo'yicha amalga oshirilib, ularning ichidan tanlangan 6 ta namunaviy quduq misolida batafsil statistik tahlil natijasida oylik o'rtacha chuqurliklarning 0.718–10.812 m, trend qiyaliklarining esa -0.45 dan $+1.02$ m/10 yilgacha o'zgarishi aniqlandi; jumladan, 1722005 quduqda $+0.107$ m/yil trend $p = 0.004$ darajada statistik ishonchli bo'lib, bu sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlari rejimi hududlar kesimida keskin farqlanishini va uning lokal gidrogeologik hamda meliorativ sharoitlarga kuchli bog'liqligini ko'rsatgan.

3. Gruntlarning suv-retensiya va gidravlik xossalari yer osti suvlari rejimini shakllantiruvchi asosiy omillardan biri ekani tajriba ma'lumotlari bilan asoslandi; jumladan, 1722005, 1722132 va 1722136 raqamli quduqlardagi qumli qatlamlarda $K = 606\text{--}1203$ sm/kun, $\theta_{fc} = 8.20\%$, $S_y = 32\%$, $n = 33\%$, $\rho_p = 1.51$ g/cm³, 1722015

va 1722073 quduqlardagi og'ir qumoq (clay loam) qatlamlarda esa mos ravishda $K = 24.5$ sm/kun, $\theta_{fc} = 28.70\%$, $S_y = 13\%$, $n = 32\%$, $\rho_p = 1.53$ g/cm³ bo'lgani, 1722101 qudug'idagi o'rta qumoq (loam) qatlamda esa $K = 98$ sm/kun, $\theta_{fc} = 32.07\%$, $S_y = 17\%$, $n = 46\%$, $\rho_p = 1.29$ g/cm³ ekani aniqlanib, filtratsiya, nam ushlanish va sizot suvlari sathi o'rtasidagi fizik bog'liqlik miqdoriy ochib berilgan.

4. Tadqiqot ma'lumotlari asosida tuproq mexanik tarkibi va filtratsiya koeffitsiyenti o'rtasidagi korrelyatsion bog'lanishlar baholanib, grunt fizikasi qonuniyatlari statistik jihatdan tasdiqlandi; bunda K -qum o'rtasida $r = +0.82$, K -soz o'rtasida $r = -0.74$, K -alevrit o'rtasida $r = -0.72$, K -dala namlik sig'imi o'rtasida $r = -0.86$, K -suv beruvchanlik koeffitsiyenti o'rtasida esa $r = +0.71$ bog'lanish qayd etildi, bu esa qum miqdori ortishi bilan suv o'tkazuvchanlik kuchayishi, gil va dala nam sig'imi ortishi bilan esa suvning ushlanib qolish xususiyati kuchayishini ko'rsatgan.

5. GAT va ko'p mezonli baholash asosida yer osti suvlari potensial va xavf zonalari xaritalanib, omillarning nisbiy ta'siri miqdoriy baholandi; AHP natijalariga ko'ra, yer osti suvlari shakllanishiga eng katta ta'sir ko'rsatuvchi omillar litologiya - 18.5%, lineament zichligi - 17.3% va geomorfologiya - 14.2% ekani aniqlandi, baholash mezonlari 1-9 ballik shkalada amalga oshirildi va modelning izchilligi $CR \leq 0.10$ sharti bilan tasdiqlandi; shu bilan birga, yer osti suvlari chuqurligi 1 m dan kichik hududlar yuqori meliorativ xavf zonalari sifatida ajratilgan.

6. Tadqiqot hududining iqlimiy sharoitlari ham yer osti suvlari rejimiga ta'sir etuvchi muhim tashqi omil sifatida baholandi va Denov, Termez, Sherobod hamda Sho'rchi stansiyalari ma'lumotlari asosida yillik yog'in miqdori mos ravishda 313 mm, 154.6 mm, 183.1 mm va 272.7 mm, aridlik indeksi esa 0.31, 0.14, 0.16 va 0.27 ekanligi aniqlandi; harorat trendi bo'yicha Termezda $+0.4^\circ\text{C}/10$ yil ($p = 0.022$), Sherobodda $+0.5^\circ\text{C}/10$ yil ($p = 0.015$) o'sish kuzatilgani bug'lanish bosimi ortib borayotganini va bu holat yer osti suvlari rejimining shakllanishida iqlim omilining rolini kuchaytirishini ko'rsatgan.

7. Yer osti suvlari sathi dinamikasini bashoratlashda machine learning va deep learning modellarining qiyosiy tahlili o'tkazilib, RF, SVM, XGBoost va LSTM modellar orasida eng yuqori natija LSTM modelida kuzatildi; 6 ta quduq bo'yicha LSTM modelida $R^2 = 0.87-0.92$, RF da 0.61-0.66, SVM da 0.59-0.64, XGBoost da 0.64-0.69 bo'lgani, shuningdek LSTM uchun 1722005 raqamli quduqda RMSE = 0.50, MAE = 0.32, 1722016 raqamli quduqda RMSE = 0.49, MAE = 0.31, 1722136 raqamli quduqda esa RMSE = 0.52, MAE = 0.33 natijalar olingani ushbu modelning vaqt qatorlaridagi murakkab nolinear bog'lanishlarni aniqroq aks ettirishini isbotlangan.

8. Tadqiqot natijalari bo'yicha yer osti suvlari sathi monitoringi, gidravlik parametrlar bazasi, xavfni zonalash va bashoratlashni birlashtiruvchi "Groundwater Information Management System" axborot tizimi, algoritmi va web-ilova yaratildi hamda amaliyotga joriy etilgan. Ushbu natija sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlari rejimini operativ nazorat qilish, ilmiy asoslangan boshqaruv qarorlarini qabul qilish va meliorativ barqarorlikni ta'minlashga xizmat qiluvchi muhim amaliy yechim sifatida tavsiflangan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.Т.10.02 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ «ТАШКЕНТСКИЙ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ИРРИГАЦИИ И МЕХАНИЗАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА»**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ИРРИГАЦИИ И
МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА»**

ЭШБОЕВ НАВРУЗ ПАНЖИ УГЛИ

**ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА
ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-
ТЕХНОЛОГИЙ И АЛГОРИТМОВ MACHINE LEARNING**

05.09.07 – Гидравлика и инженерная гидрология

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ (PhD)**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан за номером B2026.1.PhD/T6590.

Диссертация выполнена в Национальном исследовательском университете «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства».

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекском, русском и английском (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета (www.tiame.uz) и на информационно-образовательном портале «Ziyouet» (www.ziyouet.uz).

Научный руководитель:

Арифжанов Айбек Мухамеджанович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Абдуллаев Ботиржон Дадажонович
доктор геолого-минералогических наук, профессор

Абдулхаев Зоҳиджон Эркинжонович
доктор философии (PhD) по техническим наукам,
доцент

Ведущая организация:

Ташкентский архитектурно-строительный
университет

Защита диссертации состоится «16» 10 2026 г. 15⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.10.02 при Национальном исследовательском университете «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства» по адресу: 100000, г. Ташкент, ул. Кори Ниёзий, 39. Тел.: (99871) 237-22-67; факс: (99871) 237-54-79, e-mail: admin@tiame.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства» (регистрационный № 428. Адрес: 100000, г. Ташкент, ул. Кори Ниёзий, 39. Тел.: (99871) 237-22-67, e-mail: admin@tiame.uz).

Автореферат диссертации разослан «29» 09 2026 г.

(реестр протокола рассылки № 428 от «28» 09 2026 г.).



М.Х. Хамидов
председатель научного совета по
присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор

Ф.А. Ганваров
учёный секретарь научного совета
по присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор

Д.Р. Базаров
Заместитель председателя научного
семинара при научном совете по
присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире научно обоснованная оценка гидравлического режима подземных вод на орошаемых землях, определение его сезонных и территориальных изменений, а также применение современных ГИС-технологий и алгоритмов Machine Learning занимают одно из ведущих мест. В мировом масштабе возникает необходимость внедрения в практику современных подходов, позволяющих на основе ГИС-технологий оценивать гидравлический режим подземных вод на орошаемых территориях, анализировать пространственные данные, моделировать уровень подземных вод и гидравлические показатели с помощью алгоритмов Machine Learning, а также прогнозировать их изменения. В этой связи важное значение имеет анализ пространственных данных на основе ГИС-технологий при оценке гидравлического режима подземных вод на орошаемых землях, моделирование гидрогеологических показателей с использованием алгоритмов Machine Learning и прогнозирование их изменений.

В мире проводятся научно-исследовательские работы, направленные на оперативную обработку, достоверный анализ и прогнозирование больших объёмов данных, влияющих на развитие водного хозяйства, а также на применение ГИС-технологий и основанных на искусственном интеллекте алгоритмов Machine Learning при оценке гидравлического режима подземных вод. В этом направлении особое внимание уделяется разработке интеллектуальных подходов на основе ГИС и Machine Learning, ориентированных на моделирование изменений уровня подземных вод, выделение зон риска, анализ геоданных и временных рядов, снижение неопределённости и повышение точности прогнозирования, а также обоснованию современных методов оценки гидравлического режима подземных вод.

В республике осуществляются широкомасштабные меры по рациональному и эффективному использованию водных ресурсов, регулярному мониторингу состояния подземных вод на орошаемых землях, оценке их гидравлического режима, цифровизации водного хозяйства, а также применению современных ГИС-технологий и алгоритмов искусственного интеллекта; достигнуты определённые результаты. В Стратегии развития Республики Узбекистан до 2030 года, в частности, определены важные задачи по «...рациональному использованию водных ресурсов, повышению эффективности водопользования, модернизации ирригационных систем, широкому внедрению цифровых и инновационных технологий в водном хозяйстве...»¹. При реализации этих задач, в частности, важное значение приобретает создание современных научных подходов, направленных на оценку гидравлического режима подземных вод на орошаемых территориях на основе ГИС-технологий, анализ геоданных и временных рядов, моделирование и прогнозирование изменений уровня подземных вод с

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № УП-158 «О Стратегии „Узбекистан — 2030“»

помощью алгоритмов Machine Learning, а также эффективное управление водными ресурсами.

Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № УП-158 «О Стратегии „Узбекистан — 2030“», Закон Республики Узбекистан от 4 августа 2023 года № ЗРУ-1076 «Об утверждении Водного кодекса», постановление Президента Республики Узбекистан от 1 мая 2023 года № ПП-169 «О мерах по совершенствованию системы управления водным хозяйством», постановление Президента Республики Узбекистан от 7 декабря 2023 года № ПП-408 «О мерах по улучшению мелиоративного состояния сельскохозяйственных земель и рациональному использованию водных ресурсов», а также другие нормативно-правовые документы, относящиеся к данной сфере, определяют задачи, реализации которых в определённой степени служит настоящая диссертационная работа.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Настоящее исследование выполнено в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий республики V — «Сельское хозяйство, биотехнология, экология и охрана окружающей среды» и VIII — «Науки о Земле (геология, геофизика, сейсмология и переработка минерального сырья)».

Степень изученности проблемы. Теоретические основы движения подземных вод и проблемы разработки методов их расчёта изложены в трудах А. Дарси, Ж. Дюпюи, Л.С. Лейбензона, Ф. Форхгеймера, Н.Е. Жуковского, Ж. Буссинеска, Ч. Сливтера, С.Ф. Аверьянова, В.И. Аравина, Н.Н. Павловского, Г.Н. Каменского, Ф.Б. Абуталиева, Д.М. Каса, К.Ш. Латипова, Р. Садуллаева, Д.Ф. Файзуллаева, Н. Равшанова, Б. Ходжаёрова, И.К. Гавича, Т.В. Patzek, P.J. Monteiro, D.B. Silin, M. Chraibi, S. Zaleski, C. Atkinson, R.A. Isangulov, F. Franco, M.H. Hamdan и других исследователей.

Вопросы применения ГИС-технологий при исследовании водных ресурсов, а также использования алгоритмов машинного и глубокого обучения изучались R. Tomlinson, M.F. Gudchayld, P.A. Burrou, A.U. Frank, S. Openshou, D.J. Maguayr, M. Batti, G. Klark, N. Krisman, D.V. Rxind, Y. Lekun, Y. Benjio, J. Xinton, A. Greyvs, J. Shmidxuber, I. Gudfellou, T. Sejnovski, M. Jordan, P. Domingos, A. Ng, A. Arifjanov, Z. Abdulkhaev, A. Kadirkhodjaev, B. Akramov, B. Abdullaev, Z. Umarova и другими учеными, которыми достигнуты определенные положительные результаты.

Согласно проведённым научным исследованиям и их анализу, в настоящее время достигнуты определённые научно-практические результаты по оценке гидравлического режима подземных вод на орошаемых землях, пространственному анализу гидравлических параметров на основе ГИС-технологий и применению алгоритмов Machine Learning. Однако вопросы комплексной оценки гидравлического режима подземных вод в части определения коэффициента фильтрации грунтов и территориального зонирования, оценки пространственной изменчивости гидравлических параметров, а также прогнозирования физико-механических свойств грунтов на основе алгоритмов Machine Learning в рамках единого подхода изучены недостаточно глубоко.

Связь темы диссертации с планом научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках темы № 1.8 плана научно-исследовательских работ Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства» «Разработка научных основ оценки гидравлических и гидрологических процессов в ирригационных системах, гидротехнических сооружениях и водохранилищах на основе информационных технологий», совместного узбекско-китайского проекта «Применение и адаптация водосберегающих технологий Китая и Узбекистана в условиях изменения климата» (2025–2028), а также прикладного проекта MECAS по направлению «Повышение потенциала высшего образования», финансируемого Европейским союзом в рамках программы Erasmus+ (создание магистерской образовательной программы по экоинформатике для оценки воздействия на бассейн Аральского моря).

Цель исследования. Цель исследования состоит в разработке методов оценки и прогнозирования гидравлического режима подземных вод с применением ГИС-технологий, алгоритмов Machine Learning и Deep Learning.

Задачи исследования:

анализ теоретических и практических исследований по оценке гидравлического режима грунтовых вод на орошаемых землях;

исследование природных и антропогенных факторов, влияющих на формирование гидравлического режима грунтовых вод на орошаемых землях, с использованием методов дистанционного зондирования;

проведение исследований по оценке и прогнозированию изменений уровня грунтовых вод с применением алгоритмов Machine Learning и Deep Learning (нейронная сеть LSTM);

разработка комплексного метода анализа гидравлического режима грунтовых вод путем интеграции ГИС-технологий, алгоритмов Machine Learning и Deep Learning.

Объектом исследования являются орошаемые земли Сурхандарьинской области.

Предмет исследования составляют гидравлические и гидрологические процессы движения подземных вод.

Методы исследования. В процессе исследования использованы методы гидравлики и инженерной гидрологии, аналитическая обработка данных полевых исследований, статистическая обработка результатов экспериментальных исследований, алгоритмы Machine Learning и Deep Learning, методы гидрогеодинамического моделирования, а также инструменты искусственного интеллекта и языки программирования Python и JavaScript для разработки программного продукта.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствована гидродинамическая модель установившегося и неустановившегося движения потока с учетом природных и антропогенных факторов, влияющих на многолетние и сезонные изменения уровня грунтовых вод на орошаемых землях;

разработан метод оценки гидравлического режима грунтовых вод на основе интеграции гидравлических и гидрологических данных с алгоритмами искусственного интеллекта;

создана модель прогнозирования динамики грунтовых вод с использованием нейронных сетей LSTM (Long Short-Term Memory);

разработан метод анализа гидравлического режима грунтовых вод путем интеграции ГИС-технологий, алгоритмов Machine Learning и Deep Learning;

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

созданы онлайн-приложение «Groundwater Information Management System» и база данных для мониторинга уровня грунтовых вод;

созданы алгоритм (Python PL), расчетное веб-приложение и программное обеспечение, обеспечивающие оценку и управление динамикой уровня грунтовых вод;

разработана 2D-карта, отображающая сезонную направленность и уровень грунтовых вод на орошаемых территориях;

выполнено зонирование грунтов по коэффициенту горизонтальной фильтрации и разработаны соответствующие карты;

разработана модель прогнозирования динамики уровня грунтовых вод с использованием алгоритма LSTM;

с использованием методов дистанционного зондирования создано онлайн-приложение для территории исследования.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования объясняется тем, что они основаны на общепризнанных законах механики, современных ГИС-технологиях, алгоритмах Machine Learning и Deep Learning, теоретические результаты проверены путём сопоставления с результатами экспериментальных и полевых исследований, а также оценены на основе статистических и математических методов, в том числе по показателю средней квадратичной ошибки (MSE).

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в совершенствовании методов оценки гидравлического режима подземных вод на основе ГИС-технологий, алгоритмов Machine Learning и Deep Learning, разработке подхода к пространственному анализу коэффициента фильтрации грунтов и гидравлических параметров, а также создании модели прогнозирования уровня подземных вод с использованием нейронной сети LSTM.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке интерактивных карт и моделей на основе ГИС для оценки и прогнозирования гидравлического режима подземных вод, зонировании территорий по коэффициенту фильтрации, а также создании алгоритма и программного обеспечения для контроля и управления уровнем подземных вод.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов, полученных по теме оценки гидравлического режима грунтовых вод на орошаемых землях с использованием ГИС-технологий и алгоритмов машинного обучения:

разработана и внедрена в практику система мониторинга «Groundwater Information Management System», позволяющая выполнять пространственный анализ динамики уровня грунтовых вод, интегрировать гидрометеорологические и гидрогеологические данные и визуализировать результаты с помощью интерактивных карт (справка Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Узбекистан от 17 декабря 2025 года № 03-03/1-3724). На базе системы создана «Гидрогеолого-гидромелиоративная база данных (на примере Сурхандарьинской области)», охватывающая данные за 2000–2024 годы, которая зарегистрирована свидетельством Министерства юстиции Республики Узбекистан № BGU-1674. В результате создана возможность мониторинга многолетних и сезонных изменений уровня грунтовых вод;

разработана и внедрена в практику модель на основе нейронной сети LSTM (Long Short-Term Memory) для прогнозирования динамики уровня грунтовых вод (справка Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Узбекистан от 17 декабря 2025 года № 03-03/1-3724). В результате точность прогнозирования уровня грунтовых вод составила 92 %, что создало возможность заблаговременного планирования мероприятий по предотвращению его подъема;

онлайн-платформа, разработанная на основе ГИС-технологий, внедрена в деятельность Бассейнового управления ирригационных систем Аму-Сурхан Сурхандарьинской области, ЧП «Chiroy Muzrabod», территориальных управлений Национального комитета по экологии и изменению климата, а также компонента «Groundwater research» инициативы CGIAR NEXUS Gains, реализуемой Центральноеазиатским офисом Международного института управления водными ресурсами (IWMI-CA) (справка IWMI-CA от 6 июля 2025 года № ICT/145/07). В результате создана возможность оперативного принятия решений по мониторингу динамики уровня грунтовых вод и управлению водными ресурсами.

Апробация результатов исследования. Результаты настоящего исследования обсуждены на 3 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано всего 15 научных работ. В научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD) по техническим наукам, опубликовано 9 статей, в сборниках материалов конференций, индексируемых в базе данных Scopus, — 4 научные работы, а также 2 статьи в зарубежных журналах квартиля Q2; кроме того, получены 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 125 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, в котором выполнена диссертация, а также приведены цель и задачи, объект и предмет исследования. Наряду с этим изложены использованные методы исследования, научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты научная и практическая значимость результатов, их внедрение в практику, апробация и опубликованность результатов исследования, а также приведены сведения о структуре и объёме диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ теоретических и практических исследований гидравлического режима грунтовых вод»** приведены результаты аналитического обзора научно-практических исследований по изучению гидравлического режима грунтовых вод на орошаемых территориях.

В первую очередь системно рассмотрены классические подходы к определению гидравлического режима грунтовых вод на орошаемых территориях, закономерности его формирования и факторы, влияющие на изменение уровня воды. Анализ исследований показывает, что режим грунтовых вод формируется под влиянием элементов водного баланса, в том числе оросительных вод, процессов инфильтрации, дренажных систем, климатических факторов и почвенно-гидрогеологических условий.

Движение грунтовых вод и его теоретические основы проанализированы на основе закона Дарси и уравнений геофильтрации. По результатам фундаментальных и современных исследований различных ученых обосновано, что динамика уровня грунтовых вод представляет собой сложную многофакторную систему и для комплексной оценки процесса могут использоваться элементы искусственного интеллекта. Исследования показывают, что формирование и изменение грунтовых вод происходят под влиянием природных и антропогенных факторов. Установлено, что инфильтрация оросительных вод и фильтрационные потери в каналах и коллекторных системах являются одними из основных причин подъема уровня грунтовых вод. Вместе с тем наличие эффективной дренажной системы признано важным фактором обеспечения устойчивого режима грунтовых вод.

Территориальный анализ, в частности исследования на примере Сурхандарьинской области, подтверждает непосредственную зависимость динамики грунтовых вод от гидрогеологических и климатических особенностей территории, что требует индивидуального подхода к управлению для каждого ирригационного района. В рамках современных научных подходов применение географических информационных систем, дистанционного зондирования, методов Machine Learning и Deep Learning расширяет возможности оценки и прогнозирования режима грунтовых вод. В частности, научными исследованиями подтверждено, что использование нейронных сетей на основе искусственного интеллекта и моделей LSTM

позволяет с высокой точностью выявлять динамические изменения во времени. Интеграция ГИС и технологий ML/DL способствует формированию инновационных и эффективных механизмов управления грунтовыми водами.

На основе проведенных исследований установлено, что оценка и управление гидравлическим режимом грунтовых вод на орошаемых территориях требуют комплексного подхода, то есть совместного применения теоретических основ, математического моделирования и современных цифровых технологий. В результате сформулированы цель и основные задачи диссертационного исследования.

Во второй главе диссертации «**Полевые исследования по оценке гидравлического режима подземных вод на орошаемых землях и их анализ**» приведены географическое положение территории исследования, её климатические и гидрологические условия, формирование подземных вод, изменение их уровня и гидравлические характеристики, геологические, геоморфологические, литологические и гидрогеологические условия территории, показатели почв, а также анализ результатов, полученных по материалам дистанционного зондирования.

В качестве объекта исследования выбраны орошаемые земли Сурхандарьинской области. Для оценки режима подземных вод были собраны данные по 81 наблюдательной скважине за 2000–2024 годы, из которых выделены 6 репрезентативных скважин, отражающих различные типы режима.

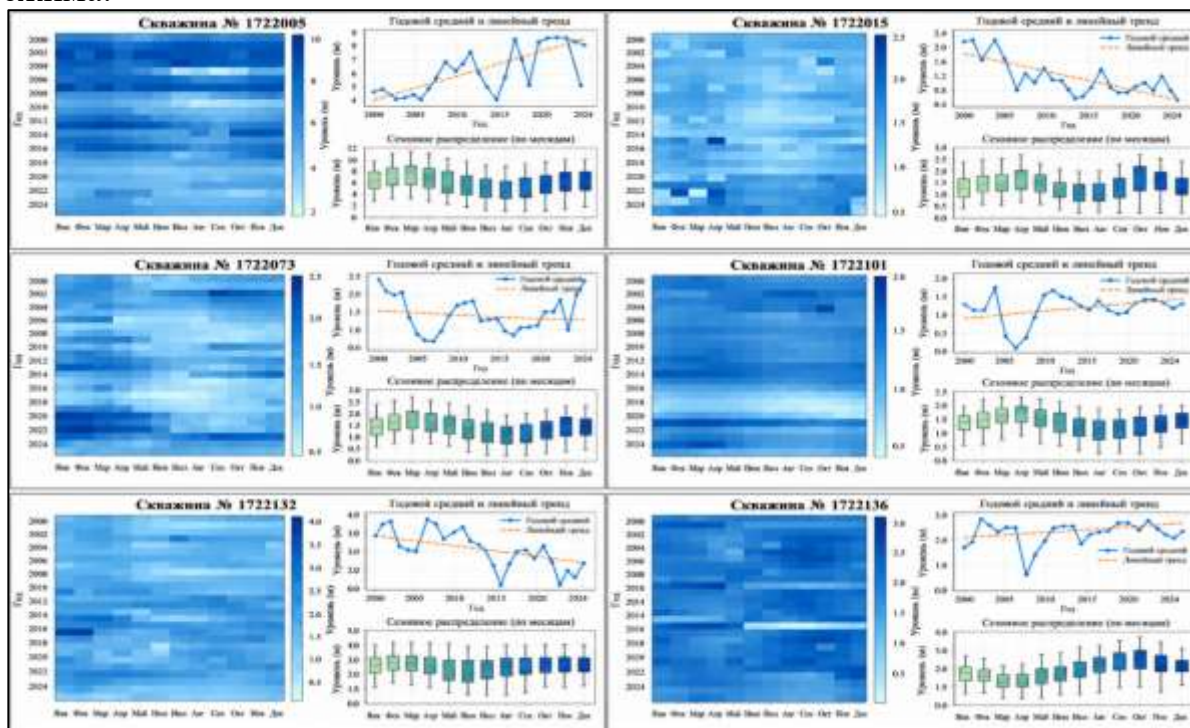


Рисунок 1. Динамика уровня подземных вод

По результатам анализа установлено, что среднемесячная глубина уровня подземных вод в выбранных скважинах изменяется от 0,72 до 10,8 м (рисунок 1). В частности, для скважины № 1722005 многолетний тренд составил +0,11 м/год и по критерию Манна–Кендалла статистически значим

при $p = 0,004$; это свидетельствует об устойчивой тенденции подъёма уровня подземных вод на отдельных территориях. По результатам анализа метеорологических факторов установлено, что на станции Денау среднегодовое количество осадков за 2000–2024 годы составило 312,8 мм, индекс аридности — 0,31, в связи с чем территория охарактеризована как полужасушливая зона; на станции Термез среднегодовое количество осадков составило 154,6 мм, индекс аридности — 0,14, что свидетельствует о преобладании засушливых условий. Согласно трендовому анализу, статистически устойчивого роста рядов осадков не выявлено, тогда как по температуре отмечены положительные тренды $+0,40$ °C/10 лет в Термезе и $+0,53$ °C/10 лет в Шерабаде. Анализ данных за последние 25 лет по бассейну Сурхандарьи показал сокращение количества осадков на 41 мм. По результатам анализа механических свойств грунтов территории исследования минимальное значение коэффициента фильтрации (K) составило 8,22 см/сут, максимальное — 12,03 м/сут, а среднее по территории — 304,5 см/сут. Значения пористости (n) изменялись от 32 % до 49 %, при среднем значении 37,16 %. Минимальное значение коэффициента водоотдачи (S_y) составило 5 %, максимальное — 32 %, среднее — 24,1 %. Диапазон полевой влагоёмкости (θ_{fc}) составил от 8,2 до 43,2 мм, а среднее по территории значение — 19,3 мм.

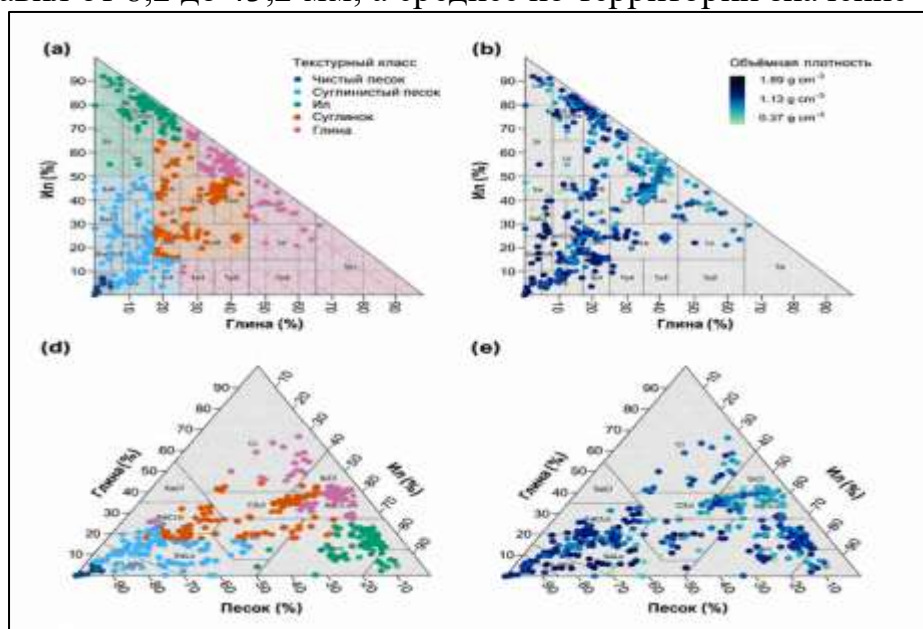


Рисунок 2. Механические свойства грунтов

Объёмная плотность (ρ_b) изменялась от 1,27 до 1,55 г/см³, при среднем значении 1,47 г/см³ (рисунок 2). Полученные показатели свидетельствуют о чередовании на территории песчаных, суглинистых и глинистых слоёв, то есть о выраженной текстурной и гидравлической неоднородности почвенного покрова. Вместе с тем средние параметры по классам текстуры также существенно различались: для глины (clay) $K = 8,22$ см/сут, $\theta_{fc} = 43,2$ мм, $S_y = 5$ %, $n = 49$ %, $\rho_b = 1,27$ г/см³; для тяжёлого суглинка (clay loam) $K = 24,5$ см/сут, $\theta_{fc} = 28,7$ мм, $S_y = 13$ %, $n = 32$ %, $\rho_b = 1,53$ г/см³; для среднего суглинка (loam) $K = 66,5$ см/сут, $\theta_{fc} = 25,4$ мм, $S_y = 17$ %, $n = 43,3$ %, $\rho_b = 1,39$ г/см³.



Рисунок 3. Структура системы мониторинга и информационного обеспечения подземных вод

В рамках исследования разработана система мониторинга и информационного обеспечения подземных вод, предназначенная для объединения данных из различных источников на единой платформе, их стандартизации, сбора, статистического и пространственного анализа, а также представления результатов в виде карт. Данная система охарактеризована как эффективный инструмент комплексной оценки и прогнозирования режима подземных вод. На основе технологий дистанционного зондирования созданы пространственные карты территории, а при оценке динамики уровня подземных вод применён многокомпонентный аналитический подход. Это позволяет выявлять влияние природных факторов, совершенствовать систему мониторинга и повышать точность прогнозных моделей.



Рисунок 4. Методическая схема онлайн-приложения на основе GEE для территории исследования

По результатам приведённых выше анализов обоснована необходимость комплексного подхода к оценке и управлению режимом подземных вод, то есть важность совместного применения полевых наблюдений, статистического анализа, ГИС-технологий и современных методов моделирования.

В третьей главе диссертации «Моделирование динамики подземных вод с использованием ГИС-технологий, алгоритмов Machine Learning и Deep Learning» изложены вопросы совершенствования метода прогнозирования динамики подземных вод с применением геоинформационных технологий и алгоритмов Machine Learning при оценке уровня подземных вод, разработки метода прогнозирования уровней подземных вод на основе нейронной сети Deep Learning (LSTM), а также выполнены оценка эффективности моделей и сопоставление полученных результатов.

Уравнение движения подземных вод с учетом коэффициентов горизонтальной и вертикальной фильтрации грунтов в декартовой системе координат записывается следующим образом:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R(t) - Q(t) \quad (1)$$

здесь, S_y — коэффициент водоотдачи, h — уровень подземных вод, K_x , K_y , K_z — коэффициенты фильтрации соответственно по направлениям x , y и z , $R(t)$ — величина притока, а $Q(t)$ — величина оттока воды. Данное уравнение выражает общее фильтрационное движение потока подземных вод. В нем показано, что изменение уровня воды во времени формируется под влиянием фильтрационных процессов в горизонтальном и вертикальном направлениях, а также внешних притоков и оттоков. Поэтому данное уравнение принято в качестве исходного теоретического выражения для гидравлического обоснования пространственно-временного изменения уровня подземных вод.

На орошаемых территориях объекта исследования гидрогеологические параметры и компоненты баланса Q_r , P , I , D являются пространственно-временными изменчивыми, поэтому их полное измерение в каждой точке (x, y, t) практически затруднительно. В связи с этим для представления физических процессов уравнения (1) на основе данных была выбрана нейронная сеть LSTM (Long Short-Term Memory), пригодная для работы с временными рядами. LSTM отличается способностью учитывать запаздывающие эффекты оросительного сезона, инерционность фильтрационного процесса и сезонные колебания посредством механизма памяти. На основе приведенного выше уравнения (1) движение подземных вод было уточнено через компоненты водного баланса и приведено к следующему виду: K_x, K_y, K_z

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q_r(t) + P(t) + I(t) - D(t) \quad (2)$$

здесь, $Q_r(t)$ — обозначает боковой или гидрогеологический приток, $P(t)$ — атмосферные осадки и естественный приток, формирующийся с поверхности земли, $I(t)$ — инфильтрацию оросительных вод, а $D(t)$ — количество воды, отводимое через дренаж. В адаптированном виде уравнения отдельно выделены основные компоненты притока и оттока для территории

исследования. Данное выражение показывает, что изменение уровня подземных вод связано не только с коэффициентами фильтрации, но и с элементами территориального водного баланса.

Данное уравнение адаптировано к условиям территории исследования и выражает баланс подземных вод на орошаемых землях в упрощенной гидравлической форме. В нем учитываются притоки $Q_r(t)$, $P(t)$, $I(t)$, а также отток $D(t)$, что позволяет обосновать формирование изменения уровня воды под совместным воздействием этих компонентов и фильтрационных процессов.

$$f_{s_y}(X_t) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(f_{k_x}(X_t) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(f_{k_y}(X_t) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + f_{q_r}(X_t) + f_p(X_t) + f_i(X_t) - f_d(X_t) \quad (3)$$

здесь, $f_{s_y}(X_t)$ отражает изменение водоотдачи по территории, $f_{k_x}(X_t)$ и $f_{k_y}(X_t)$ — пространственное распределение коэффициентов фильтрации в направлениях x и y . $f_q(X_t)$, $f_p(X_t)$ и $f_i(X_t)$ соответственно выражают влияние бокового притока, осадков и инфильтрации оросительных вод, а $f_d(X_t)$ — дренажный отток. В обобщенном виде модели пространственная изменчивость параметров выражена в функциональной форме. Тем самым в модели учтено, что параметры не имеют одинаковых значений и изменяются в зависимости от территориальных условий.

$$\hat{s}_y(t) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\hat{K}_x(t) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\hat{K}_y(t) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \hat{Q}_r(t) + \hat{P}(t) + \hat{I}(t) - \hat{D}(t) \quad (4)$$

В уравнении (4) учтена временная изменчивость параметров, что позволило дополнительно уточнить динамические свойства системы. На данном этапе пространственные функции рассматривались как зависящие от времени переменные параметры, а для оценки последующего состояния уровня подземных вод уравнение было приведено к дискретному виду:

$$\hat{h}_{t+1} = h_t + \frac{\Delta t}{\hat{s}_y(t)} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\hat{K}_x(t) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\hat{K}_y(t) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \hat{Q}_r(t) + \hat{P}(t) + \hat{I}(t) - \hat{D}(t) \right] \quad (5)$$

здесь, $\hat{h}_{(t+1)}$ — прогнозируемый уровень подземных вод для следующего момента времени, $h_{(t)}$ — уровень воды в текущий момент времени, Δt — шаг времени, $\hat{s}_y(t)$ — изменяющийся во времени коэффициент водоотдачи, $\hat{K}_x(t)$ и $\hat{K}_y(t)$ — коэффициенты фильтрации соответственно в направлениях x и y , $\hat{Q}_r(t)$, $\hat{P}(t)$, $\hat{I}(t)$ — компоненты притока, а $\hat{D}(t)$ — компонент оттока через дренаж. В дискретизированном по времени виде модели последующее значение уровня воды определяется на основе предыдущего состояния и гидравлических факторов, действующих в данном временном интервале. Данная форма позволяет рассчитывать изменение уровня воды во взаимосвязи с предыдущим состоянием, фильтрацией и элементами водного баланса.

$$\hat{h}_t = LSTM_{\theta}(X_{t-p:t-1}) \quad (6)$$

Данное выражение представляет итоговую прогнозную модель на основе LSTM. В ней значение $\hat{h}(t)$ определяется на основе данных предыдущего временного интервала $X_{t-p:t-1}$. В состав X включаются гидравлические и гидрогеологические факторы, связанные с уровнем подземных вод, включая коэффициенты фильтрации, водоотдачу, осадки, инфильтрацию оросительных вод, боковой приток и дренажный отток. Таким образом, модель LSTM, обучаясь на данных временных рядов процессам, выраженным в физических уравнениях, служит для прогнозирования последующего состояния уровня подземных вод.

Приведены результаты моделирования режима подземных вод на орошаемых территориях на основе ГИС-технологий, многокритериальной оценки, геостатистического анализа, а также алгоритмов Machine Learning и Deep Learning. Вначале пространственные факторы территории исследования — рельеф, уклон, экспозиция, плотность дренажа, геоморфология, земной покров, NDVI, плотность линейных элементов и литология — были подготовлены в виде цифровых слоёв, нормализованы на основе АНР, а потенциальные зоны и зоны риска подземных вод определены методом weighted overlay (WO). В рамках данного методического подхода критерии оценки были реклассифицированы по шкале 1–9 баллов, а согласованность модели подтверждена условием $CR \leq 0,10$. Расчёты показали, что наибольшее влияние на формирование подземных вод оказывают литология — 18,5 %, плотность линейных элементов — 17,3 % и геоморфология — 14,2 %, что свидетельствует о том, что в условиях Сурхандарьинской области режим подземных вод определяется прежде всего геологическим строением и морфоструктурными особенностями территории (рисунок 5).

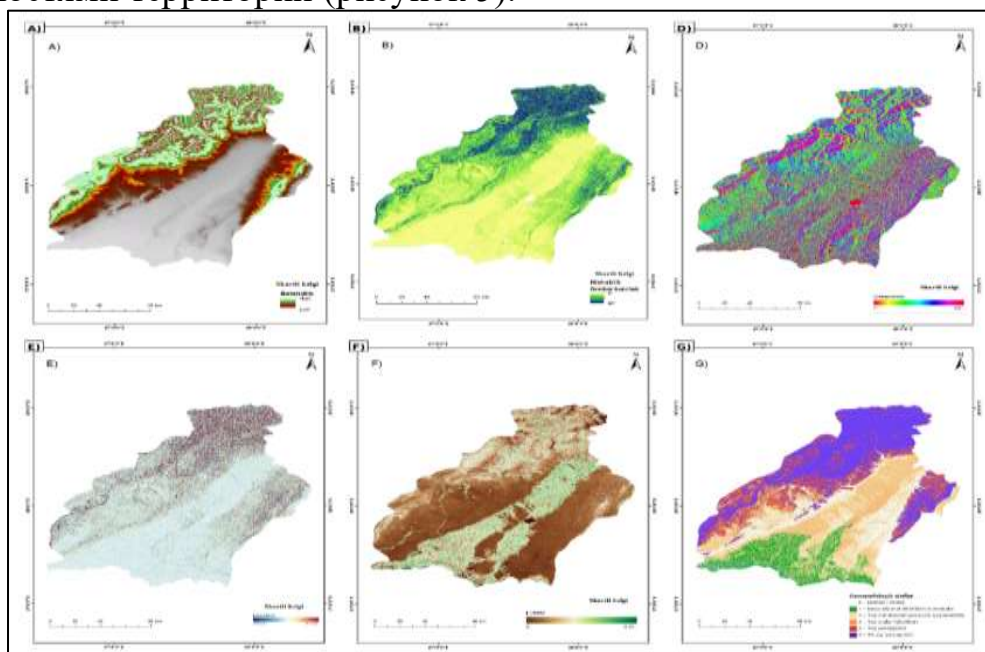


Рисунок 5. Морфометрические и геоморфологические карты территории Сурхандарьи: (А) карта высот, (В) уклон, (Д) экспозиция, (Е) кривизна, (F) NDVI, (G) геоморфологические классы

В результате пространственного моделирования построены карты средней, минимальной и максимальной глубины уровня подземных вод. На этих картах основные диапазоны глубины выделены по категориям < 1 м, 1–3

м, 3–5 м, 5–10 м и > 10 м (рисунок 6). Кроме того, разработаны карты зон риска для базового состояния и состояния на 2024 год, на которых выделены классы: очень неглубокое (< 1 м), неглубокое (1–3 м), средней глубины (3–5 м), глубокое (5–10 м) и очень глубокое (> 10 м) залегание.

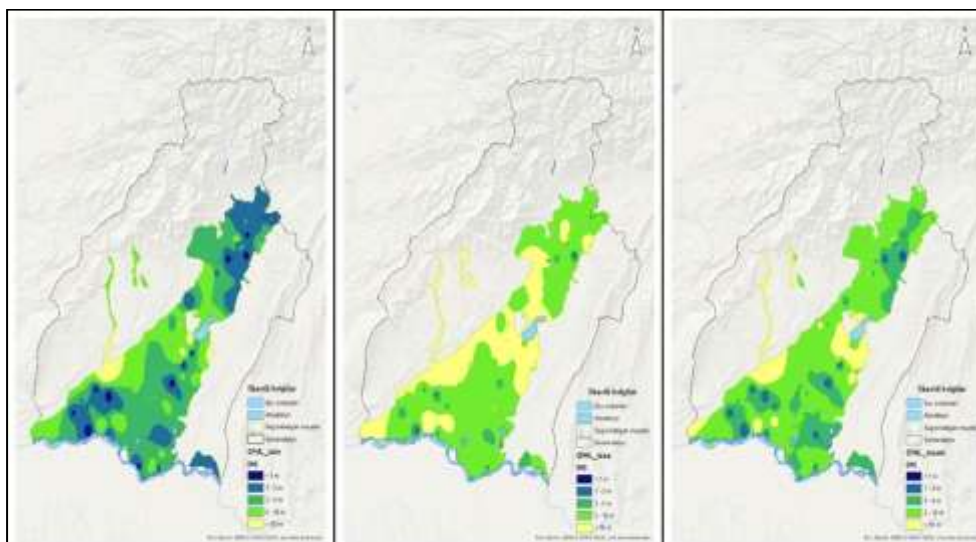


Рисунок 6. Карты минимальных, максимальных и средних значений глубины уровня подземных вод на территории исследования

При этом территории с глубиной залегания подземных вод менее 1 м выделены как зоны высокого мелиоративного риска. Полученные результаты показали неоднородность мелиоративного риска на территории: на отдельных массивах риск подъёма уровня подземных вод высок, тогда как в других зонах сохраняется относительно устойчивое состояние.

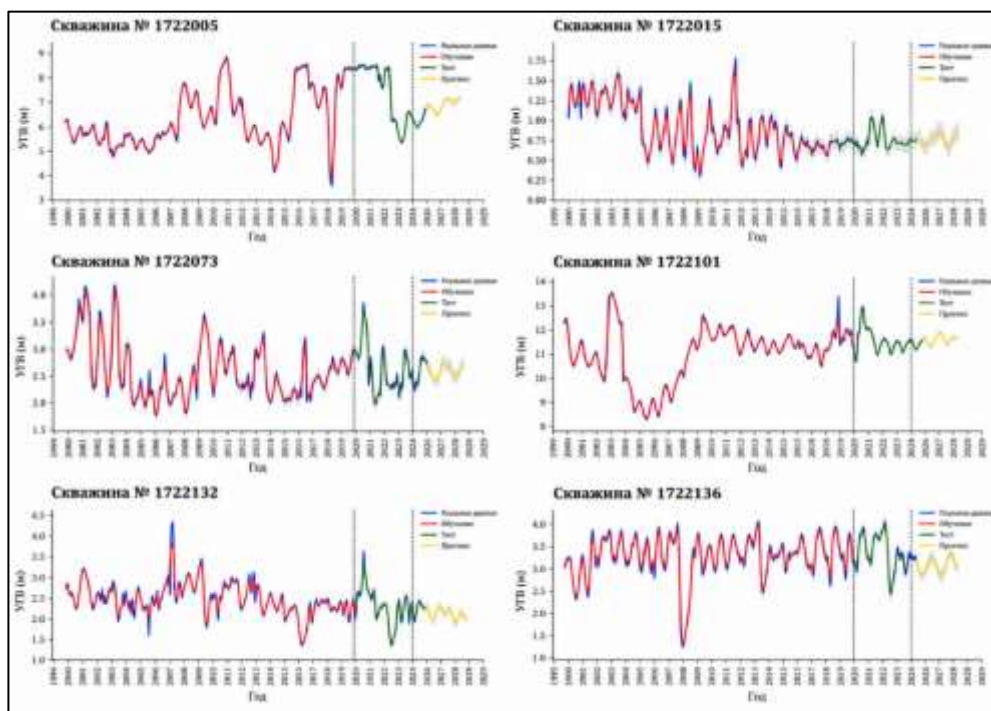


Рисунок 7. Наблюдаемая и прогнозируемая моделью LSTM динамика уровня подземных вод по репрезентативным наблюдательным скважинам

На этапе Machine Learning выполнен сравнительный анализ моделей RF, SVM, XGBoost и LSTM для прогнозирования уровня подземных вод. По результатам для 6 скважин наибольшая точность наблюдалась у модели LSTM: R^2 находился в диапазоне 0,87–0,92, тогда как для модели RF — 0,61–0,66, SVM — 0,59–0,64, XGBoost — 0,64–0,69. Для LSTM показатели ошибок по отдельным скважинам также были низкими: например, для скважины 1722005 $RMSE = 0,50$, $MAE = 0,32$; для скважины 1722016 $RMSE = 0,49$, $MAE = 0,31$; для скважины 1722136 $RMSE = 0,52$, $MAE = 0,33$. Это показало способность модели LSTM эффективно учитывать посредством механизма памяти запаздывающие воздействия оросительного сезона, инерционность дренажа и сезонные колебания. Полученные результаты свидетельствуют о том, что LSTM точнее других моделей отражает скрытые зависимости во временных рядах, сезонные колебания и запаздывающие воздействия. Оценка эффективности моделей показала, что интеграция ГИС, статистического анализа и модели LSTM является наиболее приемлемым подходом к оценке режима подземных вод (рисунок 8). Методы геостатистической интерполяции, в частности IDW, оказались эффективными для преобразования наблюдений по скважинам в непрерывные пространственные поверхности, а LSTM выделилась как наиболее надёжная прогнозная модель для временных рядов. На этой основе точность предварительного прогнозирования уровня подземных вод была доведена до 92 %. Полученные результаты с практической точки зрения создали возможность раннего выявления риска подъёма уровня подземных вод и научного обоснования решений по управлению водными ресурсами.

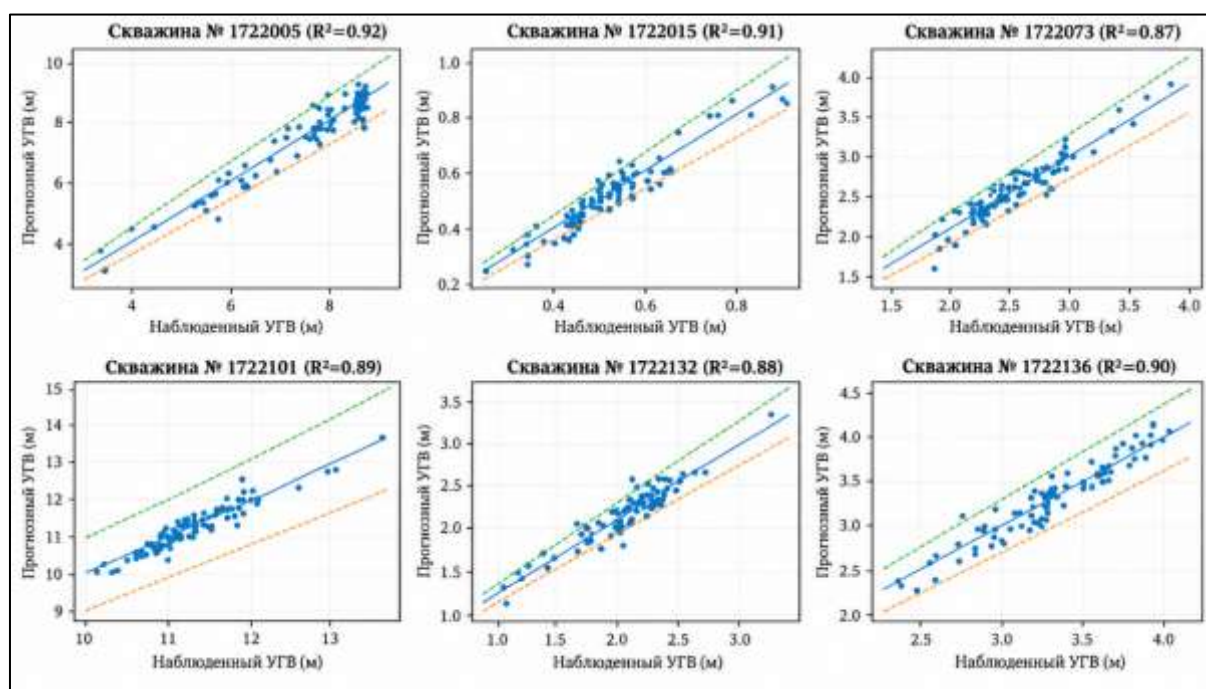


Рисунок 8. Сопоставление прогнозируемых моделью LSTM и наблюдаемых уровней подземных вод

В четвертой главе диссертации **«Рекомендации по управлению гидравлическим режимом грунтовых вод на орошаемых территориях»** освещены вопросы внедрения результатов исследования в практику, разработки рекомендаций по управлению режимом грунтовых вод и создания цифровой инфраструктуры мониторинга и прогнозирования. На основе полученных научных результатов разработана система «Groundwater Information Management System» (GWIMS), объединяющая в единую систему уровень грунтовых вод, гидрометеорологические показатели, гидрологические данные, водоудерживающие и гидравлические параметры. Эта система интегрирована с «Гидрогеолого-гидромелиоративной базой данных», сформированной по наблюдениям за 2000–2024 годы на орошаемых территориях Сурхандарьинской области и зарегистрированной в Министерстве юстиции Республики Узбекистан под № BGU-1674. В результате создана возможность мониторинга многолетних и сезонных изменений уровня грунтовых вод, оперативного анализа и территориальной оценки.

Разработанная прогнозная модель на основе LSTM внедрена в практику, и подтверждено, что при предварительной оценке динамики уровня грунтовых вод на орошаемых территориях она обеспечивает точность 92 %. Этот результат позволил заранее планировать мелиоративные мероприятия на территориях с риском подъема уровня грунтовых вод, в частности усиление дренажной нагрузки, увеличение плотности мониторинга и пересмотр режимов орошения. Таким образом, прогнозная модель продемонстрировала не только высокую теоретическую точность, но и стала инструментом принятия практических управленческих решений.

Облачная онлайн-платформа, созданная на основе ГИС-технологий, обеспечила возможность анализа уровня грунтовых вод, метеорологических показателей и гидрологических данных в единой среде и их территориальной визуализации. Платформа внедрена в деятельность Бассейнового управления ирригационных систем Аму-Сурхан Сурхандарьинской области системы Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан, ГУП «O‘zbekgidrogeologiya», ЧП «Chiroy Muzrabod», а также территориальных управлений Национального комитета Республики Узбекистан по экологии и изменению климата. В результате на практике реализованы возможности мониторинга режима грунтовых вод, оперативного выделения зон риска, оценки гидромелиоративных процессов и выбора территориальных мер управления.

Разработанные в четвертой главе рекомендации показали, что на территориях с низким коэффициентом фильтрации грунтов, высокой полевой влагоемкостью и неглубоким залеганием грунтовых вод необходимо в приоритетном порядке усиливать дренажные мероприятия. Напротив, на

песчаных массивах, характеризующихся высоким K и низким θ_{fc} , вследствие высокой скорости инфильтрации важно усилить режим мониторинга и дифференцированно управлять оросительной нагрузкой. В этой связи разработка территориальных рекомендаций на основе физических и механических параметров грунтов способствует повышению эффективности мелиоративного управления. Результаты главы показали, что разработанные методика, модели, алгоритмы и система GWIMS позволяют организовать управление режимом грунтовых вод на орошаемых территориях по цепочке наблюдение–оценка–картографирование–прогнозирование–управление. Это создает важную научно-практическую основу для рационального использования водных ресурсов, снижения риска засоления и заболачивания и территориальной оптимизации оросительных и дренажных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований, выполненных по диссертации доктора философии (PhD) на тему «Оценка гидравлического режима подземных вод на орошаемых землях с использованием ГИС-технологий и алгоритмов Machine Learning», представлены следующие выводы:

1. Усовершенствованы научно-методические основы оценки гидравлического режима подземных вод на орошаемых территориях; традиционные гидрогеологические наблюдения объединены с ГИС-технологиями, данными дистанционного зондирования и алгоритмами machine learning, в результате чего разработан подход, обеспечивающий комплексный анализ пространственно-временных изменений уровня подземных вод.

2. Многолетний мониторинг режима подземных вод выполнен по 81 наблюдательной скважине; по результатам детального статистического анализа на примере 6 выбранных репрезентативных скважин установлено, что среднемесячная глубина изменяется в пределах 0,718–10,812 м, а наклоны трендов — от $-0,45$ до $+1,02$ м/10 лет; в частности, для скважины 1722005 тренд $+0,107$ м/год статистически значим при $p = 0,004$, что показало существенное различие режима подземных вод по орошаемым территориям и его сильную зависимость от локальных гидрогеологических и мелиоративных условий.

3. На основе экспериментальных данных обосновано, что водоудерживающие и гидравлические свойства грунтов являются одним из основных факторов формирования режима подземных вод; в частности, для песчаных слоёв скважин 1722005, 1722132 и 1722136 установлены $K = 606\text{--}1203$ см/сут, $\theta_{fc} = 8,20\%$, $S_y = 32\%$, $n = 33\%$, $\rho_b = 1,51$ г/см³; для тяжёлых суглинков (clay loam) в скважинах 1722015 и 1722073 соответственно $K = 24,5$ см/сут, $\theta_{fc} = 28,70\%$, $S_y = 13\%$, $n = 32\%$, $\rho_b = 1,53$ г/см³; для среднего суглинка

(loam) в скважине 1722101 $K = 98$ см/сут, $\theta_{fc} = 32,07\%$, $S_y = 17\%$, $n = 46\%$, $\rho_p = 1,29$ г/см³. Тем самым количественно раскрыта физическая взаимосвязь между фильтрацией, водоудержанием и уровнем грунтовых вод.

4. По данным исследования оценены корреляционные связи между механическим составом почв и коэффициентом фильтрации, а закономерности физики грунтов подтверждены статистически: между K и содержанием песка установлено $r = +0,82$, между K и глиной — $r = -0,74$, между K и алевритом — $r = -0,72$, между K и полевой влагоёмкостью — $r = -0,86$, а между K и коэффициентом водоотдачи — $r = +0,71$. Это показало, что с увеличением содержания песка водопроницаемость усиливается, тогда как с увеличением содержания глины и полевой влагоёмкости возрастает способность удерживать воду.

5. На основе ГИС и многокритериальной оценки картографированы зоны потенциала и риска подземных вод, количественно оценено относительное влияние факторов; по результатам АНР установлено, что наибольшее влияние на формирование подземных вод оказывают литология — $18,5\%$, плотность линеаментов — $17,3\%$ и геоморфология — $14,2\%$. Критерии оценки ранжированы по шкале 1–9 баллов, согласованность модели подтверждена условием $CR \leq 0,10$; одновременно территории с глубиной залегания подземных вод менее 1 м выделены как зоны высокого мелиоративного риска.

6. Климатические условия территории исследования также оценены как важный внешний фактор, влияющий на режим подземных вод. По данным станций Денау, Термез, Шерабад и Шурчи установлено, что годовое количество осадков составляет соответственно 313 мм, 154,6 мм, 183,1 мм и 272,7 мм, а индекс аридности — 0,31, 0,14, 0,16 и 0,27; по температурному тренду в Термезе наблюдался рост $+0,4$ °C/10 лет ($p = 0,022$), в Шерабаде — $+0,5$ °C/10 лет ($p = 0,015$), что свидетельствует об усилении испарительного воздействия и возрастании роли климатического фактора в формировании режима подземных вод.

7. Проведён сравнительный анализ моделей machine learning и deep learning для прогнозирования динамики уровня подземных вод; среди моделей RF, SVM, XGBoost и LSTM наивысшие результаты получены для LSTM: по 6 скважинам $R^2 = 0,87$ – $0,92$, для RF — $0,61$ – $0,66$, SVM — $0,59$ – $0,64$, XGBoost — $0,64$ – $0,69$. Кроме того, для LSTM по скважине 1722005 получены $RMSE = 0,50$, $MAE = 0,32$, по скважине 1722016 — $RMSE = 0,49$, $MAE = 0,31$, по скважине 1722136 — $RMSE = 0,52$, $MAE = 0,33$, что подтвердило более точное отражение данной моделью сложных нелинейных зависимостей во временных рядах.

8. По результатам исследования созданы и внедрены в практику информационная система «Groundwater Information Management System», объединяющая мониторинг уровня грунтовых вод, базу гидравлических

параметров, зонирование риска и прогнозирование, а также соответствующие алгоритм и веб-приложение. Данный результат представляет собой важное практическое решение для оперативного контроля режима грунтовых вод на орошаемых территориях, принятия научно обоснованных управленческих решений и обеспечения мелиоративной устойчивости.

**THE SCIENTIFIC COUNCIL TO AWARDING OF THE SCIENTIFIC
DEGREES DSC 03/30.12.2019. T.10.02 AT THE “TASHKENT INSTITUTE
OF IRRIGATION AND AGRICULTURAL MECHANIZATION
ENGINEERS” NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY**

**“TASHKENT INSTITUTE OF IRRIGATION AND AGRICULTURAL
MECHANIZATION ENGINEERS” NATIONAL RESEARCH
UNIVERSITY**

ESHBOEV NAVRUZ PANJI UGLI

**ASSESSMENT OF THE HYDRAULIC REGIME OF GROUNDWATER IN
IRRIGATED LANDS USING GIS TECHNOLOGIES AND MACHINE
LEARNING ALGORITHMS**

05.09.07 - Hydraulics and Engineering Hydrology

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent - 2026

The theme of the doctoral dissertation (PhD) in technical science was registered with the Higher Attestation Commission under the Academy of Science of the Republic of Uzbekistan under the number B2026.1. PhD/T6590.

The dissertation has been prepared at the "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" National Research University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian and English (resume)) on the website of the Scientific council (www.tiame.uz) and on the website "ZiyoNet" information and educational portal www.ziynet.uz.

Scientific advisor:

Arifjanov Aybek Muxamedjanovich
doctor of technical sciences, professor

Official opponents:

Abdullayev Botirjon Dadajonovich
doctor of geological and mineralogical sciences, professor

Abdulkhayev Zohidjon Erkinjonovich
doctor of Philosophy (PhD) in technical sciences,
associate professor

Leading Organization:

Tashkent University of Architecture and Civil Engineering

The dissertation defense will be "16" 10 2026 year 1^{00 PM} at the meeting of the Scientific council DSc.03/30.12.2019.T.10.02 at the "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" National Research University. Address: 100000, Tashkent, Kori Niyoziy street, 39. Tel.: (99871) 237-22-67; Fax: (99871) 237-54-79, e-mail: admin@tiame.uz.

The dissertation is available at the Information-resource center of the "Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers" National Research University (registration number № 428). Address: 100000, Tashkent, Kori Niyoziy street, 39. Tel.: (99871) 237-22-67, e-mail: admin@tiame.uz.

The abstract of dissertation has been sent out "29" 09 2026.

(Register of the mailing protocol № 428 from "28" 09 2026).



M.Kh. Khamidov

Chairman of Scientific Council awarding
scientific degrees, doctor of agricultural
sciences, professor

F.A. Gapparov

Scientific secretar of Scientific Council
awarding scientific degrees, doctor of
technical sciences, professor

D.R. Bazarov

Deputy Chairman of the Scientific
Seminar under the Scientific Council for
awarding scientific degrees, doctor of
technical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the study is to develop methods for assessing and forecasting the hydraulic regime of groundwater using GIS technologies, Machine Learning and Deep Learning algorithms.

The object of the research are the irrigated lands of Surkhandarya region, where groundwater levels change under the influence of natural, hydrogeological, climatic and anthropogenic factors. The study focuses on irrigated areas characterized by seasonal and long-term fluctuations of groundwater levels, spatial variability of groundwater depth, and the impact of irrigation and drainage processes on groundwater dynamics.

The scientific novelty of the research are as follows:

The groundwater regime was analysed using data from 81 observation wells for 2000-2024, and 6 representative wells were selected for detailed assessment. The monthly average groundwater depth varied from 0.718 to 10.812 m, while trend slopes ranged from -0.45 to +1.02 m per 10 years. In well 1722005, a statistically significant trend of +0.107 m/year was found at $p = 0.004$.

Field and laboratory results quantified the role of soil hydraulic properties: sandy layers in wells 1722005, 1722132 and 1722136 had $K = 606\text{-}1203$ cm/day, $\theta_{fc} = 8.20\%$, $S_y = 32\%$, $n = 33\%$ and bulk density = 1.51 g/cm³; clay loam layers in wells 1722015 and 1722073 had $K = 24.5$ cm/day, $\theta_{fc} = 28.70\%$, $S_y = 13\%$, porosity = 32% and bulk density = 1.53 g/cm³; the loam layer in well 1722101 had $K = 98$ cm/day, $\theta_{fc} = 32.07\%$, $S_y = 17\%$, $n = 46\%$ and bulk density = 1.29 g/cm³.

Correlation analysis confirmed the physical links between soil texture and hydraulic conductivity: K -Sand $r = +0.82$, K -Clay $r = -0.74$, K -Silt $r = -0.72$, K -Field capacity $r = -0.86$ and K_s -Specific field $r = +0.71$.

GIS and AHP-based multicriteria assessment showed that the most influential factors controlling groundwater formation were lithology (18.5%), lineament density (17.3%) and geomorphology (14.2%). The criteria were evaluated on a 1-9 point scale, the consistency of the model was confirmed by $CR \leq 0.10$, and areas with groundwater depth of less than 1 m were identified as high meliorative risk zones.

Climate analysis showed that annual precipitation at Denov, Termez, Sherabad and Shurchi stations was 313 mm, 154.6 mm, 183.1 mm and 272.7 mm, respectively. The aridity index was 0.31, 0.14, 0.16 and 0.27, while air temperature trends increased by +0.4 °C/10 years in Termez ($p = 0.022$) and +0.5 °C/10 years in Sherabad ($p = 0.015$).

A comparative modelling assessment demonstrated the advantage of LSTM: for 6 wells, R^2 was 0.87-0.92 for LSTM, 0.61-0.66 for RF, 0.59-0.64 for SVM and 0.64-0.69 for XGBoost. For LSTM, the error indicators were RMSE = 0.50 and MAE = 0.32 for well 1722005, RMSE = 0.49 and MAE = 0.31 for well 1722016, and RMSE = 0.52 and MAE = 0.33 for well 1722136. The forecasting accuracy of groundwater level dynamics reached 92%.

Implementation of research results. Based on the scientific results obtained on the assessment of the hydraulic regime of groundwater in irrigated lands using GIS technologies and Machine Learning algorithms:

The monitoring system "Groundwater Information Management System" has been developed and introduced into practice. The system enables spatial analysis of groundwater level dynamics, integration of hydrometeorological and hydrogeological data, and visualization through interactive maps (reference of the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Uzbekistan dated December 17, 2025, No. 03-03/1-3724). The system was formed on the basis of groundwater level, meteorological and hydrological data observed in the irrigated areas of Surkhandarya region during 2000-2024 and registered by the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan under the title "Hydrogeological-hydromeliorative database (on the example of Surkhandarya region)" with certificate No. BGU-1674. As a result, opportunities were created for analysing, monitoring and promptly evaluating long-term and seasonal changes in groundwater levels and hydromeliorative processes in irrigated areas;

The LSTM (Long Short-Term Memory) neural network-based forecasting model developed for groundwater level dynamics was tested using hydromeliorative data observed in the irrigated areas of Surkhandarya region and introduced into practice (reference of the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Uzbekistan dated December 17, 2025, No. 03-03/1-3724). As a result, the forecasting accuracy of groundwater level dynamics in irrigated areas reached 92 percent, and it became possible to plan in advance the necessary meliorative measures to prevent groundwater level rise;

Using the cloud-based online platform developed on the basis of GIS technologies, the possibility was created to analyse groundwater levels, meteorological indicators and hydrological data in a unified system and to provide territorial visualization. This platform was introduced into the activities of the Amu-Surkhan Basin Administration of Irrigation Systems of Surkhandarya region under the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan, the State Unitary Enterprise "Uzbekgidrogeologiya", the private enterprise "Chiroy Muzrabod", and the territorial departments of the National Committee of the Republic of Uzbekistan on Ecology and Climate Change. As a result, opportunities were created for monitoring groundwater level dynamics, operational assessment of hydromeliorative processes and making scientifically based water management decisions.

The structure and volume of the thesis. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of used literature and appendices. The volume of the dissertation is 125 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; I part)

1. Arifjanov Aybek, Samiyev Luqmon, Li Fadong, Gafurov Zafar, Eshboyev Navruz, Abduraimova Dilbar, Xiaohui Pan, Jalilova Xumora, Akramov Jamoliddin "Stable groundwater table and rising salinity in Angor district of Surkhandarya region (Uzbekistan): Seasonal analysis" // Water Conservation & Management (WCM) 9(2) (2025) pp. 436-441. DOI: <http://doi.org/10.26480/wcm.02.2025.414.419>. (Scopus Q2)
2. Eshboyev Navruz, Gafurov Zafar, Alikhanov Bokhir, Muminov Sherzod, Pulatov Yarash, Kenjabayev Shavkat "Impact of climate change on the inflow of Charvak lake by three rivers (Pskem, Koksus, Chatkal) modelled by QSWAT+" // Water Conservation and Management (WCM) 10(1) (2026) pp. 01-07. DOI: <http://doi.org/10.26480/wcm.01.2026.01.08>. (Scopus Q2)
3. Arifjanov Aybek, Eshboyev Navruz, Abdullayeva Muhayyo "Qiziriqdara uchastkasidagi yer osti suvlarining gidrologik rejimiga meliorativ tizimlarning ta'siri" // O'zMU xabarlaril ilmiy jurnali, 2024 y, 1-son, 212-215 b. ISSN 2181-7324. (04.00.00 №7)
4. Eshboyev Navruz, Nosirov Nozimbek, Abdullayeva Muhayyo "Average air temperature trend analysis: a case study of Surkhandarya region, Uzbekistan" // O'zMU xabarlaril ilmiy jurnali, 2025 y, 3.1.1-son, 279-282 b. ISSN 2181-7324 (04.00.00 №7)
5. Eshboyev Navruz, Apakxujayeva Tursunoy, Matkaziye Dilshod "Shimoliy Surxondaryo uchastkasida yer osti suvlari sath dinamikasini baholash" // Arxitektura, Qurilish va Dizayn ilmiy-amaliy jurnali, 2024 y, 3-son, 680-682 b. (05.00.00 №4)
6. Arifjanov Aybek, Eshboyev Navruz "Assessment of groundwater level dynamics in irrigated areas based on GIS" // Xorazm Ma'mun Akademiyasi axborotnomasi, 2024 y, 9/1-son, 211-216 b. (06.00.00 №12)
7. Arifjanov Aybek, Eshboyev Navruz, Bektashov Behruz "Evaluation of the seasonal geospasial changes in the groundwater level in irrigated lands: as an example of Muzarbod district of Surkhandarya region, Uzbekistan" // "Agro Ilm" agrar-iqtisodiy, ilmiy-amaliy jurnali, №3 [124], 2026, 70-74 b. (05.00.00 №4)
8. Apakxujayeva Tursunoy, Ruziye Dilmurod, Eshboyev Navruz, Matkaziye Dilshod "Fazo va vaqt yondashuvi asosida Chorvoq suv omboriga quyiladigan suv miqdori o'zgarishlari tahlili" // Arxitektura, Qurilish va Dizayn ilmiy-amaliy jurnali, 2024 y, 3-son, 635-640 b. (05.00.00 №4)
9. Hamidov Sardor, Pulatov Baxtiyor, Eshboyev Navruz "Accuracy evaluation of satellite-based precipitation in Ferghana valley" // "Ecology" Scientific Journal, 2025 y, No. 1, pp. 38-48. (06.00.00 №2)

II bo‘lim (II часть; II part)

10. Arifjanov Aybek, Samiyev Luqmon, Eshboyev Navruz, Akramov Jamoliddin, Xodjimuxamedova Shaxida, Makhmudov Bekzod “The analysis of groundwater table variations in Termez district of Surkhandarya region, Uzbekistan: a spatio-temporal approach” // BIO Web of Conferences 141, 02018 (2024) AGRICULTURAL SCIENCE 2024
11. Samiyev Luqmon, Akramov Jamoliddin, Eshboyev Navruz, Xodjimuxamedova Shaxida, Makhmudov Bekzod “Assessment of groundwater levels and mineralization in irrigated areas using geographic information systems (a case study of Buvayda district)” // BIO Web of Conferences 141, 02015 (2024) AGRICULTURAL SCIENCE 2024
12. Ilxamdjanova Dildora, Eshboyev Navruz “Shahar hududida yer osti suvlari dinamik rejimini geofazoviy usulda tahlil qilish (Termiz shahri misolida)” // “Atrof-muhit muammolarini hal qilishda tabiatga asoslangan yechimlar” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman materiallar to‘plami. – Toshkent, 2024-yil, 470-476 b.
13. Eshboyev Navruz, Miraxmedov Tolkin “Hydrogeological conditions of irrigated lands in the Surkhandarya region” // Proceedings of the International scientific and technical conference “Current Issues in Earth Sciences”. – Toshkent, 2024-yil, 56-59 b.
14. Arifjanov Aybek, Eshboyev Navruz “Yer osti suvlari dinamikasini hisoblash” EHM dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi, Mualliflik guvohnomasi № DGU 43990, Talabnoma DGU 2024 11937 (06.11.2024)
15. Eshboyev Navruz “Gidrogeologik-gidromeliorativ-gidrometeorologik ma’lumotlar bazasi” EHM dasturi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi, Mualliflik guvohnomasi № BGU 1674, Talabnoma BM 2024 40440 (06.11.2024)

Avtoreferat «O‘zbekiston qishloq va suv xo‘jaligi» Agrar-iqtisodiy, ilmiy-ommabop jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlari o‘zaro muvofiqlashtirildi (27.08.2026 yil).



Bosishga ruxsat etildi: 16.09.2026-yil.
Bichimi 60x84 ^{1/16}, “Times New Roman”
garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 2.9. Adadi: 100. Buyurtma: № 129.
Tel (99) 817 44 54.
Guvohnoma reyestr № 219951
“PUBLISHING HIGH FUTURE” OK nashriyotida bosildi.
Toshkent sh., Uchtepa tumani, Ali qushchi ko‘chasi, 2A-uy.