

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALARI VA SUN'YI INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMYIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI  
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.13.30.12.2021.T.142.01 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALARI VA SUN'YI INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMYIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**MURODULLAYEV BAXTIYOR TO'LG'IN O'G'LI**

**TAKRORIY EKIN EKILADIGAN HUDUDLARDA GEOFILTRATSIYA  
JARAYONLARINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH**

05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui

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

**Toshkent – 2025**

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

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

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

**Murodullayev Baxtiyor To'liqin o'g'li**

Takroriy ekin ekiladigan hududlarda geofiltrtsiya jarayonlarini matematik modellashtirish.....5

**Муродуллаев Бахтиёр Тўлқин ўғли**

Математическое моделирование процессов геофильтрации на территориях с повторным посевом.....21

**Murodullaev Bakhtiyor Tulkin ugli**

Mathematical modeling of geofiltration processes in areas with repeated cropping..... 41

**E'lon qilingan ishlar ro'uxati**

Список опубликованных работ

List of published works.....44

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALARI VA SUN'YI INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI  
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.13.30.12.2021.T.142.01 RAQAMLI  
ILMIY KENGASH**

---

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALARI VA SUN'YI INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**MURODULLAYEV BAXTIYOR TO'LG'IN O'G'LI**

**TAKRORIY EKIN EKILADIGAN HUDUDLARDA GEOFILTRATSIYA  
JARAYONLARINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH**

05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui

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

**Toshkent – 2025**

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.1.PhD/T4421 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.airi.uz) va "Ziyonet" Axborot ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Xabibullayev Ibroxim**

texnika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Raxmonov Zafar Ravshanovich**

fizika-matematika fanlari doktori, dotsent

**Daliyev Sherzod Karshiyevich**

texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

**Yetakchi tashkilot:**

**Qarshi davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi DSc.13.30.12.2021.T.142.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil "31" yanvar soat 15<sup>00</sup> dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent shahri, M. Ulug'bek tuman, Bo'z-2 mavzesi, 17A uy. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: info@airi.uz).

Dissertatsiya bilan Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (52 -raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100125, Toshkent shahri, M. Ulug'bek tuman, Bo'z-2 mavzesi, 17A uy. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: info@airi.uz).

Dissertatsiya avtoreferati, 2025-yil "19" yanvar kunida tarqatildi.  
(2024-yil "16" dekabr dagi 20 raqamli reestr bayonnomasi.)



*[Handwritten signature]*

**N.Ravshanov**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi,  
texnika fanlari doktori, professor

*[Handwritten signature]*

**F.M.Nuraliyev**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi,  
texnika fanlari doktori, professor

*[Handwritten signature]*

**E.Sh.Nazirova**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,  
texnika fanlari doktori, professor

## **Kirish (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahon iqtisodiyotining jadal rivojlanishida ko‘plab ilmiy tadqiqotlar, xalq xo‘jaligining turli amaliy masalalari matematik modellashtirish, sonli usullar va dasturlar majmui hamda hisoblash eksperimentlari asosida to‘g‘ri aniqlash zarurligini ko‘rsatmoqda. O‘sib borayotgan aholini oziq-ovqat mahsulotlari bilan ta‘minlash masalasi yechimlari takroriy ekinlar yetishtirish bo‘lsa, bunda maydonlarni sug‘orish, melioratsiya va atrof-muhitga salbiy ta‘sirini minimallashtirishga katta e‘tibor qaratilmoqda. Shu sababli, gidrogeologiya va irrigatsiya sohasida dinamik o‘zgaruvchan tizimlarning geofiltratsiya modelini yaratish, axborot ta‘minoti va murakkab jarayonlarni samarali tadqiq qilish imkonini beruvchi raqamli texnologiyalar va sun‘iy intellekt usullariga ehtiyoj ortib bormoqda. Dunyoning aksariyat mintiqalarida, jumladan AQSh, Germaniya, Daniya, Fransiya, Xitoy, Hindiston, Pokiston, Yaponiya, Rossiya Federatsiyasi va ko‘plab boshqa davlatlarda murakkab geofiltratsiya jarayonlarini matematik modellashtirish, sonli yechimlar va dasturlar majmuini yaratish usullaridan keng qo‘llanilmoqda.

Jahonda gidrogeologik tadqiqotlar rivojlanishi geofiltratsiya va geomigratsiya jarayonlarini matematik modellashtirish hamda sonli usullar rolining ortishi bilan tavsiflanadi. Oldindan belgilab qo‘yilgan hisob-kitoblarning ishonchliligi va aniqligiga tobora ortib borayotgan talablarni bajarish amaliy matematika va modellashtirishning ahamiyatini, shuningdek, yer osti suvlari konlari resurslaridan oqilona foydalanish, takroriy ekin ekiladigan hududlarda geofiltratsiya jarayonlarini matematik modellashtirish va yuqori texnologiyali dasturiy vositalarni qo‘llash, ilmiy hamda amaliy usullarni takomillashtirishga katta e‘tibor qaratilmoqda.

Respublikamizda geologiya, suv va qishloq xo‘jaligi faoliyatida muhim ahamiyatga ega bo‘lgan yer osti suv resurslari holatini baholash, monitoring va bashorat qilish bilan bog‘liq murakkab gidrodinamik jarayonlarning matematik modellarini takomillashtirish va amaliyotga joriy etish chora-tadbirlarini ishlab chiqishga alohida e‘tibor berilmoqda. Jumaladan, O‘zbekiston Respublikasining taraqqiyot strategiyasida, “... xalq xo‘jaligini rivojlantirishning 2020-2030 yillarga mo‘ljallangan vazifalarni amalga oshirishda, mavjud resurslardan samarali foydalanish orqali boshqali don ekinlaridan bo‘shaydigan maydonlarga ekinlarning tezlashar navlarini takroriy ekin sifatida qisqa muddatlarda ekish, sug‘orish, parvarishlash va agrotexnika tadbirlarini o‘tkazilishini doimiy ravishda nazorat qilish, monitoringini yuritish tizimini yo‘lga qo‘yish hamda ilmiy tadqiqot natijalarini amaliyotga tatbiq etish”<sup>1</sup> vazifalari belgilangan. Ushbu vazifalarning muvaffaqiyatli bajarilishi murakkab gidrogeologik tizimlarni holatini kuzatish, tahlil qilish va samarali foydalanish, turg‘unmas geofiltratsiya jarayonini matematik modeli, algoritmi hamda dasturiy vositalarni ishlab chiqish muhim ahamiyatga ega.

Bu borada O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining tegishli qarorlarida ham ko‘rsatib o‘tilgan. Jumladan, 2018-yil 19-fevral “Axborot texnologiyalari va

---

<sup>1</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “O‘zbekiston Respublikasi qishloq xo‘jaligini rivojlantirishning 2020-2030 yillarga mo‘ljallangan strategiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”gi farmoni

kommunikatsiyalari sohasini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida’gi PF-5349-sonli Farmoni, 2023-yil 11-sentabrda “O‘zbekiston – 2030 strategiyasi to‘g‘risida’gi PF-158-son farmoni va Qashqadaryo viloyat hokimining 2019-yil 1-apreldagi tegishli qarori bilan viloyatda g‘alladan bo‘shagan maydonlarga takroriy ekin ekishning prognoz ko‘rsatkichlari belgilab berilgan hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining IV. “Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq amalga oshirilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Geofiltratsiya va geomigratsiya jarayonlarini matematik modellashtirish va sonli usullar asosida takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvlari harakatlarini o‘rganish bo‘yicha ilmiy adabiyotlar tahlili ushbu yo‘nalishda bir qator ahamiyatli nazariy va amaliy natijalar olinganligini ko‘rsatdi. A.Darsi, F.Forxgeymer, J.Dyupyui, J.Bussinesk, N.Y.Jukovskiy va boshqa xorijiy olimlarning ilmiy ishlari yer osti gidrodinamikasi jarayonlarini matematik modellashtirishning fundamental aspektlariga bag‘ishlangan. P.Y.Polubarinova-Kochina, V.I.Aravina, S.N.Numerov, G.N.Kamensk, A.I.Silina-Bekchurin, P.P.Klimentov, G.B.Pixachev, V.A.Mironenko, I.K.Gavich, V.N.Shelkachev, M.A.Guseyn-zade, V.M.Shestakov, N.N.Verigin, I.A.Charniy, F.M.Bochever, M.S.Xantush, S.Ye.Jakob, K.E.Lembke, M.Lyuis, P.J.Monteiro, Ch.H.Rycroft, G.I.Barenblatt, T.W.Patzek, D.B.Silin, M.Chraibi, S.Zaleski, F.Franco, C.Atkinson, R.A.Isangulov, M.H.Hamdan, J.Bear, A.Verruijt, T.P.Clement, G.F.Pinder, W.G.Gray, T.E.Reilly, A.W.Harbaugh, R.J.Hunt, C.Zheng, W.Kinzel, G.D.Bennett, D.A.Benson, R.F.Carsel, R.S.Parrish, M.M.Meyerschayert va boshqa tadqiqotchilar yer osti suvlari sathining o‘zgarishi va minerallashuvi jarayonlarining matematik modellarini yaratishda katta hissa qo‘shdilar.

O‘zbekistonda gidrodinamika, geofiltratsiya jarayonlarining matematik modellari va samarali sonli usullarini ishlab chiqishda F.B.Abotaliyev, R.Sadullayev, J.F.Fayzullayev, N.Muxidinov, M.M.Oripov, R.N.Usmonov, N.Ravshanov, I.Habibullayev, J.X.Djumanov, E.Sh.Nazirova, A.Ne‘matov, Sh.Daliyev, X.Egamberdiyev va boshqa olimlar salmoqli ilmiy natijalarga erishishgan. Bugungi kunda gidrogeologik jarayonlarni hududlar bo‘yicha taqsimlanganlik xususiyatlarini va yer osti suvlari holatini monitoringi, tartib elementlarini hisobga olinishi bilan filtratsiya jarayonlarni matematik modellashtirish hamda hisoblash tajribalari asosida har tomonlama tahlil qilish usullarini integratsiyasi muammolari namoyon bo‘lmoqda.

Takroriy ekin ekiladigan hududlarda sug‘oriladigan uchastkalar uchun axborot tizimini ishlab chiqish va bu axborot tizimdan har bir uchastkaning xususiy parametrlarini qabul qilib, fazo va vaqtga nisbatan jarayon uchun adekvat fizik xususiyatlarni hisoblash, hamda taklif qilinayotgan matematik model orqali yer osti

suvlarining harakati va sathini aniqligi yuqori bo'lgan ma'lumot sifatida taqdim etuvchi algoritmi yetarli darajada o'rganilmagan.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti Muxammad Al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universitetida U-AT-2021-493 "Yer osti suvlarining sathini, haroratini va elektr o'tkazuvchanligini masofadan aniqlovchi innovatsion uskuna yaratish" (2021-2023) mavzulardagi ilmiy loyihasi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqot maqsadi** takroriy ekin ekiladigan maydonlarda sug'orish rejimlarni hisobga olgan holda yer osti suvlari sathi o'zgarishini bashorat qilish uchun matematik modellar, sonli algoritmlar va dasturiy ta'minotini ishlab chiqish hamda uni takomillashtirishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

sug'orish suvlarining yer osti suvlariga ta'siri jarayonlarini tadqiq qilishga bag'ishlangan xorijiy va mahalliy olimlarning ilmiy ishlarini tahlilini amalga oshirish;

o'rganilayotgan geofiltratsiya jarayonining axborot modelini ishlab chiqish;

sug'orish natijasida yer osti suvlari sathining o'zgarishini hamda yer osti suv qatlamida balans elementlarining ta'sir jarayonlarini tavsiflovchi matematik modelini takomillashtirish va masalani yechish uchun sonli algoritmini ishlab chiqish;

sug'orish rejimining o'zgarishi natijasida aeratsiya zonasini to'yinishi va uning tarqalishi hamda sug'orish suvlarini yer osti suvlari sathiga tutashish hamda qatlamining to'yinib borish jarayonining matematik modelini va uni yechishni samarali sonli algoritmini ishlab chiqish;

takroriy ekin ekiladigan maydonlarda sug'orish rejimlarni hisobga olgan holda yer osti suvlari sathi o'zgarishini bashoratlash uchun dasturiy vositani ishlab chiqish.

**Tadqiqotning obykti** sifatida yer osti suvlari fizik xususiyatlarining o'zaro bog'liqlikdagi geofiltratsiya va geomigratsiya jarayonlari qaralgan.

**Tadqiqotning predmetini** takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvi shakllanishi sharoitlarining matematik modeli, hisoblash algoritmlari va EHMda hisoblash ishlarini olib borish uchun dasturiy majmua tashkil etadi.

**Tadqiqotning usullari.** Dissertatsiya ishini bajarish jarayonida hisoblash matematikasi, matematik modellashtirish va hisoblash tajribasi usullari, sonli usullar, tizimli tahlil hamda dasturiy mahsulotlar ishlab chiqish uchun ob'ektga yo'naltirilgan dasturlash texnologiyalaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

sug'orish natijasida yer osti suvlari sathining o'zgarishini va suvli qatlam balans elementlarining ta'sir omillarini tavsiflovchi geofiltratsiya jarayonlarining matematik modeli takomillashtirilgan;

aeratsiya hududini to'yinishi va takroriy ekinlarni sug'orish rejimining o'zgarishi natijasida suvlarini tarqalishi, yer osti suvlari sathiga tutashishi hamda qatlamining to'yinib borish jarayonining matematik modeli ishlab chiqilgan;

gidrogeologik bog‘langan suvli qatlamlarning geofiltratsiya va geomigratsiya jarayonlarining matematik modeli va sonli yechimlari hamda samarali algoritmlari ishlab chiqilgan;

takroriy ekin ekiladigan maydonlarning fizik xususiyatlarini inobatga olgan holda ishlab chiqilgan modelning koeffitsientlarini umumiy vaqt integratsiyasida har qadamda yangilab boruvchi hisoblash algoritmi ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

takroriy ekin ekiladigan yerlarda yer osti suvlarining harakati va sathini bashoratlash imkonini beruvchi matematik modelning sonli yechimlari va samarali algoritmlari ishlab chiqildi;

aeratsiya hududini to‘yinishi va takroriy ekin ekiladigan maydonlarning fizik xususiyatlarini inobatga olgan holda ishlab chiqilgan modelning koeffitsientlarini umumiy vaqt integratsiyasida har qadamda hisoblash imkonini beruvchi algoritmi va dasturiy majmui yaratildi;

modellash asosida suvning konveksiya va diffuziya jarayonlarini hisobga olib, yer osti suvlarining harakat tezliklari va konsentratsiyasini aniqlash, harorati va tuproqning to‘yinish darajasini, o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentini hisoblash hamda melioratsiya tadbirlarini o‘tkazishga doir amaliy tavsiyalar ishlab chiqildi.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tadqiqot natijalarining ishonchliligi batafsil matematik ifodalar, massa saqlanishi va A.Darsi qonuniga qat’iy mosligi bilan tasdiqlangan. Modelning adekvatlik masalasi ob’ekt elementlari farqini minimallashtirish bilan amalga oshirilgan, sonli tajriba-hisoblash natijalari o‘lchov-kuzatuv monitoringi ma’lumotlari bilan taqqoslanganligi, hisoblash jarayonining turg‘unligi va yaqinlashuvchanligi, hisob natijalari o‘rganilayotgan jarayonlarning tabiatiga zid emasligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati gidrogeologik tizimlarda matematik modellashni ilmiy umumlash, yer osti suvlari geofiltratsiya jarayonlarini tabiiy va antropogen omillar ta’sirida o‘zgarishini baholash hamda yer osti suvlari sızilish ko‘rsatkichlarini axborot ta’minoti va hisoblash eksperiment usullarini rivojlantirish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarning amaliy ahamiyati yer osti gidrosferasida geofiltratsiya jarayonlari bilan birgalikdagi, takroriy ekin ekiladigan hududlarda bir qatlamli g‘ovak muhitlarda turli boshlang‘ich va chegaraviy shartlar asosida yer osti suvi sathi holatini baholashda samarali algoritmlar va dasturiy vositalar ishlab chiqilganligi, bu esa hisoblash vaqtini kamaytirdi va yer osti suvlari sathini aniqlash uchun muhandislik hisob-kitoblarining aniqligini oshirish bilan tavsiflanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti va yer usti suvlarini birgalikda hamda o‘zaro bog‘liqliqdagi geofiltratsiyasi jarayonlarining matematik modellari, shuningdek samarali sonli hisoblash algoritmlari asosida:

sug‘orish natijasida yer osti suvlari sathining o‘zgarishini va suvli qatlam balans elementlarining ta’sir omillarini tavsiflovchi geofiltratsiya jarayonlarining takomillashtirilgan matematik modeli hamda aeratsiya hududini to‘yinib borish jarayonining matematik modeli “Amu-Qashqadaryo ITHB huzuridagi nasos



stansiyalari va energetik boshqarmasi” da joriy qilingan. (O‘zbekiston Respublikasi Suv xo‘jaligi vazirligining 2024-yil 30-oktyabrdagi 05/13-4053-son ma’lumotnomasi). Natijada murakkab gidrogeologik va suv tanqisligi sharoitida yer osti gidrosferasi monitoringini yuritish, suv ta’minotida meliorativ samaradorlikni 4-7% ko‘targan; yer osti suvi sathini me’yorda saqlash chora-tadbirlari asosida qishloq xo‘jalik ekinlari hosildorligining 2-5% o‘shiga imkon yaratgan;

gidrogeologik bog‘langan suvli qatlamlarning geofiltratsiya va geomigratsiya jarayonlari matematik modelini amalga oshirish sonli yechimlari va samarali algoritmlari hamda ishlab chiqilgan modelning koeffisientlarini umumiy vaqt integratsiyasida har qadamda hisoblash algoritmi va dasturiy majmiyi asosida “Kasbi irrigatsiya bo‘limi” da joriy qilingan. (O‘zbekiston Respublikasi Suv xo‘jaligi vazirligining 2024-yil 30-oktyabrdagi 05/13-4053-son ma’lumotnomasi). Natijada qo‘llanilishi yer osti gidrosferasida suv xo‘jalik sharoitlarining o‘zgarish holati, monitoring va samarali boshqaruv qarorlarini qabul qilish tizimini shakllantirish imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Mazkur dissertatsiya tadqiqotining natijalari 5 ta xalqaro va 8 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 34 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 12 ta maqola, jumladan, 1 ta xorijiy va 18 ta respublika jurnallarida chop etilgan hamda 4 ta EHM uchun yaratilgan dasturiy vositalarni qayd qilish guvohnomalari olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiyaning hajmi 118 betni tashkil etgan bo‘lib, kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining O‘zbekiston Respublikasi fani va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mos ravishda dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqotning obykti va predmeti ko‘rsatilgan, uning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, nazariy va amaliy ahamiyatlari ochib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etish holatlari, shuningdek, tadqiqot natijalarining chop etilganligi hamda dissertatsiya tuzilishi haqida ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiya ishining “**Takroriy ekin ekiladigan hududlarda geofiltratsiya jarayonlarini matematik modellashtirishning ilmiy-nazariy asoslari**” deb nomlangan birinchi bobida takroriy ekin ekiladigan hududlarda geofiltratsiya jarayonlarini matematik modellashtirish bo‘yicha xalqaro va mahalliy ilmiy adabiyotlar tahlil qilingan. Sug‘oriladigan hududlarda yer osti suvlari sathini bashorat qilish uchun ishlab chiqilgan matematik modellar asosida misollar keltirilgan.

1.1-paragrafda, takroriy ekin ekishning meliorativ holatlarini tahlil qilish va boshqarish uchun tizimli yondashuv va matematik modellashtirish usullarining ahamiyati ta'kidlangan.

1.2-paragrafda, xorijiy va mahalliy tajribalar o'rganilib, Web of Science platformasidagi ilmiy maqolalar tahlil qilingan. 1.3-paragrafda, yer osti suvlarini modellashtirishda yer osti suv gorizontining tuzilishi, suv o'tkazuvchanligi, bug'lanish va sug'orish natijasidagi o'zgarishlar hisobga olingan. Hidrografik tarmoq va yer osti suvlarining o'zaro ta'siri ham ko'rib chiqilgan.

Dissertatsiya ishining **“Takroriy ekin ekiladigan hududlarida yer osti suvlarini harakatini matematik va sonli modelini takomillashtirish”** deb nomlagan ikkinchi bobida takroriy ekin ekiladigan hududlardagi yer osti grunt suvlarini matematik va sonli modellarini takomillashtirish masalasi ko'rib chiqilgan. Yer osti suvlarining asosiy ko'rsatkichlari, sug'orish suvi, sizilish omillari va suv resurslari haqida batafsil axborot modeli tuzilgan. Kasbi tumanidagi yer osti suvlarining ekspluatatsion jarayonlari, rejim kuzatuvlari natijalari tahlil qilinib, suv sathini o'zgarishini bashorat qilish, sizilish joylari va ularning miqdorini aniqlash masalalari o'rganilgan. Shuningdek, takroriy ekin ekiladigan hududlarda grunt suvlar geofiltratsiya jarayonlarining matematik modeli takomillashtirilgan.

2.1-paragrafda, takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suv sathini bashoratlash uchun sug'oriladigan maydonlarning fizik xususiyatlari va ta'sir etuvchi omillarni hisobga olib, axborot ta'minoti shakllantirilgani va bu asosda matematik modellashtirish hamda sonli usullar yordamida vaqt va fazoga nisbatan yechimlar olish masalalari ko'rib chiqilgan. Meliorativ ishlar orqali tuproq unumdorligini oshirish va yaroqsiz yerlardan foydalanish tadqiq qilingan. Kasbi tumani misolida yer osti suvlarining harakatini geofiltratsion model orqali bashorat qilish, hududning fizik va meliorativ xususiyatlari tahlili hamda suv balansi va boshqa omillar asosida axborot ta'minoti yaratilgan.

2.2-paragrafda, takroriy ekin ekiladigan hududlardagi yer osti suvlarining harakatini tavsiflovchi matematik model takomillashtirilgan. Suvli qatlamdagi yer osti suv sathi pastki gorizont suv o'tkazmaydigan qatlamga nisbatan olinib, bu harakat parabolik turdagi xususiy hosilali chiziqli bo'lmagan differensial tenglama bilan ifodalanadi va u quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W \quad (1)$$

va uning boshlang'ich hamda chegaraviy shartlari quyidagicha bo'ladi:

$$h(x, y, 0) = h_0(x, y), \quad (2)$$

$$kh \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\lambda(h-h_0), \quad kh \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=L} = \lambda(h-h_0), \quad (3)$$

$$kh \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\lambda(h-h_0), \quad kh \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{y=L} = \lambda(h-h_0), \quad (4)$$

bu yerda:  $h_0$  -sizot suv sathining boshlang'ich qiymati;  $\lambda$  -hisob chegarasi orqali massa almashinuv koeffitsiyenti;  $t_0$  -boshlang'ich vaqt;  $\mu$  - suvli qatlamning suv berish qobiliyati (o'lchovsiz qiymat);  $h = h(x, y, t)$  - yer osti suvlarining suv

o'kazmaydigan qatlamdan yer sirtigacha bo'lgan darajasi qiymati;  $x, y$ - tekislik koordinatalari;  $t$  - vaqt, sutka;  $k = k(x, y, t)$  - filtratsiya koeffitsienti va u quyidagicha ifodalangan:

$$k(x, y, t) = k_0(x, y) \frac{h(x, y, t) + h_0(x, y)}{2h(x, y)};$$

bu yerda  $k_0$  - filtratsiya koeffitsientining dastlabki qiymati;  $h_0$  - dastlabki yer osti suvlari sathi.  $W$  - ozod hadlarning algebraik yig'indisi va uning ifodalanishi:

$$W = \delta_k \eta_k Q_k - \delta_b \eta_b Q_b - \delta_d \eta_d Q_d - \delta_z \eta_z Q_z + \delta_{in} \eta_{in} Q_{in} + \delta_s \eta_s Q_s;$$

bu yerda  $\delta$  - derakt delta funksiyasi;  $\delta_m = \begin{cases} x = x_m, y = y_m, & 1 \\ x \neq x_m, y \neq y_m, & 0 \end{cases}; m \in [k, b, d, z, in, s];$

$\eta$  - modelni o'lchovli ko'rinishga o'tkazish koeffitsiyenti (tengliklarning massa almashinuvi koeffitsiyenti),  $Q_d$  - yer ostidan olinadigan suv miqdori;  $Q_b$  - sathdan bug'lanish;  $Q_{in}$  - yer osti suvlarining atmosfera yog'inlari bilan infiltratsion to'yinishi;  $Q_k$  - kanallardan yer ostiga suv shimilishi;  $Q_z$  - yer ostidan suv chiqishi (zavurlarga);  $Q_s$  - sug'oriladigan davrda beriladigan suv miqdori.

Qo'yilgan masalani yechish uchun ushbu:

$$h^* = \frac{h}{h_0}, k^* = \frac{k}{k_0}, x^* = \frac{x}{L}, y^* = \frac{y}{L}, \tau = \frac{k_0 h_0}{\mu L^2} t,$$

$$\eta_{in} = \frac{2L^2}{k_0 h_0^2}, \eta_b = \frac{2L^2}{k_0 h_0^2}, \eta_d = \frac{2L}{k_0 h_0^2}, \eta_r = \frac{2L}{k_0 h_0^2}, \eta_z = \frac{2L}{k_0 h_0^2}, \eta_s = \frac{L^2}{k_0 h_0^2}.$$

o'lchovsiz kattaliklarni kiritamiz. U holda (1) – (4) yer osti sizot suv sathi o'zgarish jarayoni matematik modeli va mos chegaraviy shartlari quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{1}{\tilde{h}} \frac{\partial h^*}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k^* \frac{\partial h^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k^* \frac{\partial h^*}{\partial y} \right) + 2W^*, \quad (5)$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{L} k^* h^* \frac{\partial h^*}{\partial x} \Big|_{x^*=0} = -\lambda(h_0 h^* - h_0), \quad \frac{k_0 h_0^2}{L} k^* h^* \frac{\partial h^*}{\partial x} \Big|_{x^*=1} = \lambda(h_0 h^* - h_0), \quad (6)$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{L} k^* h^* \frac{\partial h^*}{\partial y} \Big|_{y^*=0} = -\lambda(h_0 h^* - h_0), \quad \frac{k_0 h_0^2}{L} k^* h^* \frac{\partial h^*}{\partial y} \Big|_{y^*=1} = \lambda(h_0 h^* - h_0), \quad (7)$$

Soddalashtirish maqsadida (5) tenglamani va (6) - (7) chegaraviy shartlardagi «\*» belgisini tushirib, tenglamani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$\frac{1}{\tilde{h}} \frac{\partial h^2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + 2W, \quad (8)$$

boshlang'ich vaqt  $\tau = \tau_0$  bo'lsin. U holda boshlang'ich shart va chegaraviy shartlar:

$$h \Big|_{\tau=\tau_0} = h_0,$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{L} k h \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\lambda(h_0 h - h_0), \quad \frac{k_0 h_0^2}{L} k h \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=1} = \lambda(h_0 h - h_0), \quad (9)$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{L} k h \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\lambda(h_0 h - h_0), \quad \frac{k_0 h_0^2}{L} k h \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{y=1} = \lambda(h_0 h - h_0). \quad (10)$$

2.3.-paragrafida, takroriy ekin ekiladigan hududlarning yer osti suvlarining harakatini matematik modelini takomillashtirish va uning sonli yechimi keltirilgan.

(1) va (8) masalalar chiziqli bo‘lmagan differensial tenglamalar sistemalari bilan ifodalanganligi sababli ularni analitik usulda yechish murakkab bo‘ladi. Shu bois ko‘rilayotgan masalalarning yechimlarini topish uchun sonli usullardan foydalanamiz. (1)-(4) masalalarni sonli yechish uchun chekli ayirmalar usulini qo‘llaymiz. Buning uchun  $D = \{0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq t \leq N\}$  sohaga to‘r kiratamiz, bu yerda izlanayotgan jarayon oralig‘idagi  $N$  maksimal vaqt,  $D$  sohaning  $[0,1]$  va  $[0,1]$  intervali,  $\Delta x, \Delta y$  qadamlar,  $[0, N]$  ni  $\Delta \tau$  qadam bilan bo‘lib chiqamiz va quyidagi to‘rga ega bo‘lamiz:

$$\omega_{\Delta x, \Delta y, \Delta \tau} = \{x = i\Delta x; i = 0, 1, 2, \dots, I; \quad y = j\Delta y; j = 0, 1, 2, \dots, J; \quad t_n = n\Delta \tau; n = 0, 1, 2, \dots, N\},$$

$n + \frac{1}{2}$  qatlamda (8) tenglama hamda (9) – (10) chegaraviy shartlarni  $\omega_{\Delta x, \Delta y, \Delta \tau}$

to‘rda oshkormas sxemani qo‘llab approksimatsiya qilib quyidagi chekli ayirmali tenglamalarga ega bo‘lamiz:

$$\frac{1}{\tilde{h}_{i,j}} \frac{(h^2)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (h^2)_{i,j}^n}{0.5\Delta \tau} = \frac{k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} (h^2)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} - \frac{(k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}}) (h^2)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} (h^2)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} +$$

$$+ \frac{k_{i,j-0.5}^n (h^2)_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} - \frac{(k_{i,j-0.5}^n + k_{i,j+0.5}^n) (h^2)_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \frac{k_{i,j+0.5}^n (h^2)_{i,j+1}^n}{\Delta y^2} + 2W_{i,j}^n. \quad (11)$$

(11) tenglamani sath funksiyasining kvadratiga nisbatan  $h^2 \approx 2\tilde{h}h - \tilde{h}^2$  kabi yozamiz. O‘xshash hadlarni ixchamlaganimizdan keyin algebraik tenglamalar sistemasi ko‘rinishida ifodalaymiz:

$$Ox \text{ yo‘nalishida:} \quad a_{i,j} h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j} h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -d_{i,j}, \quad (12)$$

$$\text{bu yerda: } a_{i,j} = \frac{2k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i-1,j}}{\Delta x^2}, \quad b_{i,j} = \frac{2 \left( k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \tilde{h}_{i,j}}{\Delta x^2} - \frac{4}{\Delta \tau}, \quad c_{i,j} = \frac{2k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i+1,j}}{\Delta x^2},$$

$$d_{i,j} = \left( \frac{4}{\Delta \tau} - \frac{2(k_{i,j-0.5}^n + k_{i,j+0.5}^n) \tilde{h}_{i,j}}{\Delta y^2} \right) h_{i,j}^n + \frac{2k_{i,j-0.5}^n \tilde{h}_{i,j-1}}{\Delta y^2} h_{i,j-1}^n +$$

$$+ \frac{2k_{i,j+0.5}^n \tilde{h}_{i,j+1}}{\Delta y^2} h_{i,j+1}^n - \frac{k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i-1,j}^2}{\Delta x^2} + \frac{\left( k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \tilde{h}_{i,j}^2}{\Delta x^2} - \frac{k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i+1,j}^2}{\Delta x^2} -$$

$$- \frac{k_{i,j-0.5}^n \tilde{h}_{i,j-1}^2}{\Delta y^2} + \frac{(k_{i,j-0.5}^n + k_{i,j+0.5}^n) \tilde{h}_{i,j}^2}{\Delta y^2} - \frac{k_{i,j+0.5}^n \tilde{h}_{i,j+1}^2}{\Delta y^2} + 2W_{i,j}^n.$$

$$Oy \text{ yo‘nalishida:} \quad \bar{a}_{i,j} h_{i,j-1}^{n+1} - \bar{b}_{i,j} h_{i,j}^{n+1} + \bar{c}_{i,j} h_{i,j+1}^{n+1} = -\bar{d}_{i,j}, \quad (13)$$

$$\text{bu yerda: } \bar{a}_{i,j} = \frac{2k_{i,j-0.5}^{n+1} \tilde{h}_{i,j-1}}{\Delta y^2}, \quad \bar{b}_{i,j} = \frac{2(k_{i,j-0.5}^{n+1} + k_{i,j+0.5}^{n+1}) \tilde{h}_{i,j}}{\Delta y^2} - \frac{4}{\Delta \tau}, \quad \bar{c}_{i,j} = \frac{2k_{i,j+0.5}^{n+1} \tilde{h}_{i,j+1}}{\Delta y^2},$$

$$\begin{aligned} \bar{d}_{i,j} = & \left( \frac{4}{\Delta\tau} - \frac{2 \left( k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \tilde{h}_{i,j}}{\Delta x^2} \right) h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{2k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i-1,j}}{\Delta x^2} h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + \\ & + \frac{2k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i+1,j}}{\Delta x^2} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i-1,j}^2}{\Delta x^2} + \frac{\left( k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \tilde{h}_{i,j}^2}{\Delta x^2} - \frac{k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i+1,j}^2}{\Delta x^2} - \\ & - \frac{k_{i,j-0.5}^{n+1} \tilde{h}_{i,j-1}^2}{\Delta y^2} + \frac{\left( k_{i,j-0.5}^{n+1} + k_{i,j+0.5}^{n+1} \right) \tilde{h}_{i,j}^2}{\Delta y^2} - \frac{k_{i,j+0.5}^{n+1} \tilde{h}_{i,j+1}^2}{\Delta y^2} + 2W_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, \end{aligned}$$

(12) va (13) tenglamalar progonka metodidan foydalanib hisoblaymiz:

$$Ox \text{ yo'nalishida: } h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \alpha_{i+1,j} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + \beta_{i+1,j},$$

$$Oy \text{ yo'nalishida: } h_{i,j}^{n+1} = \bar{\alpha}_{i,j+1} h_{i,j+1}^{n+1} + \bar{\beta}_{i,j+1},$$

rekurrent formulalardan foydalanib (15) va (16) larda  $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \bar{\alpha}_{i,j}, \bar{\beta}_{i,j}$  larni topish uchun  $i$  ni  $i-1$  ga,  $j$  ni  $j-1$  ga almashtiramiz:

$$h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = \alpha_{i,j} h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \beta_{i,j}, \quad h_{i,j-1}^{n+1} = \bar{\alpha}_{i,j} h_{i,j}^{n+1} + \bar{\beta}_{i,j},$$

bu yerda:  $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \bar{\alpha}_{i,j}, \bar{\beta}_{i,j}$  lar progonka koeffitsiyentlari, hisob kitoblardan so'ng  $Ox, Oy$  yo'nalishlari uchun progonka koeffitsiyentlarini topish uchun quyidagi rekurentlardan foydalanamiz:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \frac{c_{i-1,j}}{b_{i-1,j} - a_{i-1,j} \alpha_{i-1,j}}, & \beta_i &= \frac{d_{i-1,j} + a_{i-1,j} \beta_{i-1,j}}{b_{i-1,j} - a_{i-1,j} \alpha_{i-1,j}}, \\ \bar{\alpha}_j &= \frac{\bar{c}_{i,j-1}}{\bar{b}_{i,j-1} - \bar{a}_{i,j-1} \bar{\alpha}_{i,j-1}}, & \bar{\beta}_j &= \frac{\bar{d}_{i,j-1} + \bar{a}_{i,j-1} \bar{\beta}_{i,j-1}}{\bar{b}_{i,j-1} - \bar{a}_{i,j-1} \bar{\alpha}_{i,j-1}}, \end{aligned}$$

chegaraviy shartlarni oshkormas sxemani qo'llab approksimatsiya qilamiz:

$$Ox \text{ yo'nalishi bo'ylab: } \frac{k_0 h_0^2}{2L} k_{1,j} \frac{2h_{1,j} h_{1,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{1,j}^2 - 2h_{0,j} h_{0,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{0,j}^2}{\Delta x} = -\lambda (h_0 h_{1,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_0),$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{2L} k_{l,j} \frac{2h_{l,j} h_{l,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{l,j}^2 - 2h_{l-1,j} h_{l-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{l-1,j}^2}{\Delta x} = \lambda (h_0 h_{l,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_0),$$

$$Oy \text{ yo'nalishi bo'ylab: } \frac{k_0 h_0^2}{2L} k_{i,1} \frac{2h_{i,1} h_{i,1}^{n+1} - h_{i,1}^2 - 2h_{i,0} h_{i,0}^{n+1} + h_{i,0}^2}{\Delta y} = -\lambda (h_0 h_{i,1}^{n+1} - h_0),$$

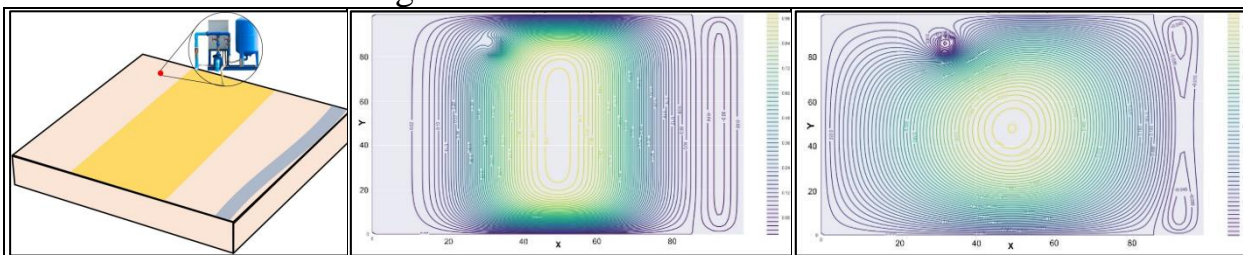
$$\frac{k_0 h_0^2}{2L} k_{i,J} \frac{2h_{i,J} h_{i,J}^{n+1} - h_{i,J}^2 - 2h_{i,J-1} h_{i,J-1}^{n+1} + h_{i,J-1}^2}{\Delta y} = \lambda (h_0 h_{i,J}^{n+1} - h_0).$$

Dastlabki yaqinlashish sifatida biz qo'yilgan masalaning boshlang'ich shartini olamiz va quyidagicha (14) iteratsiyada tekshiramiz:

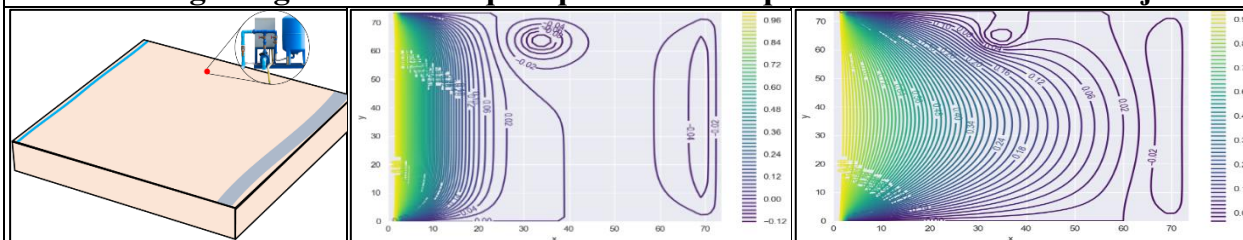
$$\left| (h_{i,j})^{(s+1)} - (h_{i,j})^{(s)} \right| \leq \varepsilon; \quad (14)$$

bu yerda:  $s$  – iteratsiyalar soni;  $\varepsilon$  – iteratsion jarayonning aniqligi (0.001).

2.3.-paragrafida, takroriy ekin ekiladigan hududlarning yer osti suvlarini harakatining takomillashtirilgan matematik modeli uchun sonli tajriba natijalari 1 va 2 – rasmlarda keltirilgan:



**1-rasm. Sug‘orilgan hududda quduq va zahkash qo‘llash holati hamda natijalari**



**2-rasm. Hududda kanal, quduq va zahkash qo‘llash holati hamda natijalari**

Dissertatsiya ishining “**Takroriy ekin ekiladigan hududlarda geofiltratsiya jarayonini aeratsiya zonasini fizik va meliorativ xususiyatlarini inobatga holda matematik va sonli modellashtirish**” deb nomlagan uchinchi bobida takroriy ekin ekiladigan hududlarda geofiltratsiya jarayonini aeratsiya zonasining fizik va meliorativ xususiyatlarini hisobga olgan holda matematik va sonli modellashtirish ko‘rib chiqilgan. Matematik modelni qurishda yer usti va yer osti omillarini hisobga olib, mavjud axborot modellari va adabiyotlardan kelib chiqib, yangi model taklif qilingan. Jarayon asosan massa ko‘chishiga asoslangan bo‘lib, suyuqlik oqimining tezligi, sirt tarangligi va molekulyar diffuziya kabi omillar hisobga olingan matematik model taklif etilgan.

3.1.-paragrafida, sug‘oriladigan ekin maydonlarda geofiltratsiya jarayonining fizik xususiyatlarini inobatga olib matematik modellashtirish keltirilgan.

Sug‘oriladigan maydonlarda, geofiltratsiya jarayonining fizik xususiyatlarini inobatga olib sonli modellashtirish uchun quyidagi matematik modelni taklif etildi. Qatlamda sathni ifodalash uchun muhitdagi suv konsentratsiyasining taqsimlanishi va bosim o‘zgarishi tenglamasi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (1-H) \left( u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) = (1-H) \left( D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + W_C, \quad (15)$$

$$S_{save} \frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho g} + z \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{P}{\rho g} + z \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{P}{\rho g} + z \right) \right) + W_c + W_{Lz}, \quad (16)$$

bu yerda:  $C(x, y, z, t)$ -muhitdagi suv konsentratsiyasi;  $S_{save}$  - muhitning suv saqlash koeffitsienti;  $u(x, y, z, t)$ ,  $v(x, y, z, t)$ ,  $w(x, y, z, t)$ - konveksya tezliklari;  $\rho g$  - suvning zichligi va yerning tortishish tezlanishi;  $D_x(x, y, z, t)$ ,  $D_y(x, y, z, t)$ ,  $D_z(x, y, z, t)$  -diffuziya koeffitsientlari;  $W_c + W_{Lz}$  - Sug‘orish yoki manba chizig‘i, ya’ni suv qatlamiga tashqi tomondan qo‘shilayotgan yoki undan chiqarilayotgan suv miqdorini ifodalaydi.

$\Omega = \{x_i = x_0 + i\Delta x, i = 0, 1, \dots, N_x; y_j = y_0 + j\Delta y, j = 0, 1, \dots, N_y; z_k = z_0 + k\Delta z, k = 0, 1, \dots, N_z, T_n\}$ ,

vaqtini hisoblashi uchun quyidagi tenglikdan foydalanamiz:  $T_n = \sum_{\tau=0}^n \Delta t_\tau$ .

Cekli-ayrimali sxemani turg'unligini saqlash uchun vaqt qadamini quyidagicha aniqlaymiz:

$$\Delta t^n = \min \left( \frac{\Delta x}{u_{max}^n}, \frac{\Delta y}{v_{max}^n}, \frac{\Delta z}{w_{max}^n}, \frac{\Delta x^2}{2D}, \frac{\Delta y^2}{2D}, \frac{\Delta z^2}{2D} \right).$$

Dastlabgi vaqt iteratsiyasi uchun (boshlang'ich shartlar).

$$C(x, y, z, t)|_{t=0} = C_0(x, y, z), \quad P(x, y, z, t)|_{t=0} = P_0(x, y, z),$$

Konsentratsiya va bosimning chegaraviy nuqtalardagi qiymatlarini quyidagi tengliklar orqali kiritildi. Konsentratsiyani ifodolovchi  $C$  funksiya uchun:

$$\begin{aligned} x=0, \quad C(0, y, z, t) &= C(x + \Delta x, y, z, t) + (C(x + \Delta x, y, z, t) - C(x + 2\Delta x, y, z, t)), \\ x=L_x, \quad C(x, y, z, t) &= C(x - \Delta x, y, z, t) + (C(x - \Delta x, y, z, t) - C(x - 2\Delta x, y, z, t)), \\ y=0, \quad C(x, 0, z, t) &= C(x, y + \Delta y, z, t) + (C(x, y + \Delta y, z, t) - C(x, y + 2\Delta y, z, t)), \\ y=L_y, \quad C(x, y, z, t) &= C(x, y - \Delta y, z, t) + (C(x, y - \Delta y, z, t) - C(x, y - 2\Delta y, z, t)), \\ z=0, \quad C(x, y, 0, t) &= C(x, y, z + \Delta z, t) + (C(x, y, z + \Delta z, t) - C(x, y, z + 2\Delta z, t)), \\ z=L_z, \quad C(x, y, z, t) &= W_{L_z}. \end{aligned}$$

Bosim funksiyasining chegaraviy nuqtalardagi qiymatlarini hisoblash uchun:

$$\begin{aligned} x=0, \quad P(x, y, z, t) &= P(x + \Delta x, y, z, t) + (P(x + \Delta x, y, z, t) - P(x + 2\Delta x, y, z, t)), \\ x=L_x, \quad P(x, y, z, t) &= P(x - \Delta x, y, z, t) + (P(x - \Delta x, y, z, t) - P(x - 2\Delta x, y, z, t)), \\ y=0, \quad P(x, y, z, t) &= P(x, y + \Delta y, z, t) + (P(x, y + \Delta y, z, t) - P(x, y + 2\Delta y, z, t)), \\ y=L_y, \quad P(x, y, z, t) &= P(x, y - \Delta y, z, t) + (P(x, y - \Delta y, z, t) - P(x, y - 2\Delta y, z, t)), \\ z=0, \quad P(x, y, z, t) &= P(x, y, z + \Delta z, t) + (P(x, y, z + \Delta z, t) - P(x, y, z + 2\Delta z, t)), \\ z=L_z, \quad P(x, y, z, t) &= P(x, y, z - \Delta z, t) + (P(x, y, z - \Delta z, t) - P(x, y, z - 2\Delta z, t)), \end{aligned}$$

Chegara va soha ichida ta'sir etuvchi balans elementlari:

$$W_C = \delta_d Q_d + \delta_k Q_k - \delta_z Q_z; \quad W_{L_z} = \delta_{in} Q_{in} - \delta_b Q_b + \delta_s Q_s.$$

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & x = x_m, y = y_m, z = z_m, t = t_m; \\ 0, & x \neq x_m, y \neq y_m, z \neq z_m, t \neq t_m. \end{cases} \quad (m \in [d, k, z, in, b, s])$$

Sath funksiyasini aniqlash uchun quyidagi munosibatdan foydalanamiz:

$$H(x, y, z, t, C) = \begin{cases} 1, & \begin{cases} C_{max}(x, y, z', t) - C(x, y, z', t) \leq \varepsilon \quad \forall z' \leq z, \\ C_{max}(x, y - \Delta y, z - \Delta z, t) - C(x, y - \Delta y, z - \Delta z, t) \leq \varepsilon, \\ C_{max}(x, y + \Delta y, z - \Delta z, t) - C(x, y + \Delta y, z - \Delta z, t) \leq \varepsilon, \\ C_{max}(x - \Delta x, y, z - \Delta z, t) - C(x - \Delta x, y, z - \Delta z, t) \leq \varepsilon, \\ C_{max}(x + \Delta x, y, z - \Delta z, t) - C(x + \Delta x, y, z - \Delta z, t) \leq \varepsilon. \end{cases} \\ 0. \end{cases}$$

bu yerda:  $C_{max}(x, y, z, t)$  -muhitning maksimal suv qabul qilish konsentratsiyasi.

O'tkazuvchanlik koeffitsiyenti esa quyidagi ifoda bilan aniqlaniladi:

$$k(x, y, z, t) = k_0 \left( 1 + \frac{P(x, y, z, t)}{P_0} - \frac{S(x, y, z, t)}{S_0} \right) \frac{T(x, y, z)}{T_0} (1 - F(x, y, z, t)),$$

bu yerda:  $k_0$  -joriy o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti;  $P(x, y, z, t)$  -bosim funksiya;  $S(x, y, z, t)$  -suvning tuzlilik darajasi;  $T(x, y, z)$  -temperatura;  $F(x, y, z, t)$  -tuproqning to'yinish darajasi;  $P_0, S_0, T_0$  -koeffitsiyentlarning boshlang'ich qiymati.

Darsi qonuniga asosan suyuqlikning g'ovak muhitda sizish tezliklari quyidagicha aniqlanadi:

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Tuproqning to'yinishi darajasining oshishini va keyinchalik barqaror holatga qaytishini ifodalovchi logistik o'sish funksiyasidan foydalanamiz:

$$F(x, y, z, t) = F_{max}(x, y, z) \frac{1}{1 + e^{-k_F(t-t_0)}},$$

bu yerda:  $F_{max}$  -tuproqni maksimal to'yinish darajasi;  $k_F$  -tuproqni to'yinish koeffitsiyenti,  $t_0$  -infleksiya nuqtasi, ya'ni to'yinish jarayonining eng tez o'sish vaqtini ko'rsatadi. Suvning sho'rlanish darajasi vaqt o'tishi bilan o'zgarishini quyidagi funksiya orqali aniqlaymiz:

$$S(x, y, z, t) = S_0(x, y, z) e^{-k_s t},$$

bu yerda:  $S_0$  -suvning boshlang'ich sho'rlik darajasi;  $k_s$  -suvning sho'rlanishligining pasayish koeffitsiyenti.

3.2. – paragrafida, takroriy ekin ekiladigan hududlarda aeratsiya zonasini fizik va melorativ xususiyatlarini inobatga olgan holda geofiltratsiya jarayonining matematik modelning sonli yechimi keltirilgan.

(15)- tenglamani chekli ayirmali oshkor sxemalar yordamida tenglamani vaqt va fazoviy koordinatalarda diskretlab olamiz. Umumiy adveksiya-diffuziya tenglamasi uchun diskretlash quyidagicha amalga oshiriladi:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t^n} = (1 - H(x_i, y_j, z_k, T_n, C_{i,j,k}^n)) \left( \begin{array}{l} -u_{i,j,k}^n \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta x} - v_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta y} - \\ -w_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta z} + D_x \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ + D_y \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + D_z \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \end{array} \right) + W_{C_{i,j,k}}^n, \quad (17)$$

bu yerda:  $u_{i,j,k}, v_{i,j,k}, w_{i,j,k}$  -adveksiya komponentlari,  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  -fazoviy qadamlar;  $D_x, D_y, D_z$  - diffuziya koeffitsientlari.

(17)- tenglamani orqali, umumiy diskretlangan tenglamani iterativ yechimini olish uchun tenglamaning ma'lum va noma'lumlarga ajratamiz.

$$C_{i,j,k}^{n+1} = C_{i,j,k}^n + \Delta t^n \left( H(x_i, y_j, z_k, T_n, C_{i,j,k}^n) - 1 \right) \left( \begin{array}{l} u_{i,j,k}^n \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta y} + w_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta z} - \\ - D \left( \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \right. \\ \left. + \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \end{array} \right) + W_{C_{i,j,k}}^n.$$



(16) – tenglama orqali, bosim uchun har bir komponentni vaqt bo‘yicha va fazo bo‘yicha diskretizatsiyalangan tenglamaga kiritamiz.

$$\begin{aligned}
 S_{save} \frac{1}{\rho g} \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t^n} = & \frac{k_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \left( \frac{P_{i+1,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta x^2} - \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i-1,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta x^2} + \\
 & + \frac{k_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \left( \frac{P_{i,j+1,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta y^2} - \frac{k_{i,j-\frac{1}{2},k}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j-1,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta y^2} + \\
 & + \frac{k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left( \frac{P_{i,j,k+1}^n}{\rho g} + z_{k+1} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta z^2} - \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k-1}^n}{\rho g} - z_{k-1} \right)}{\Delta z^2} + W_{c\ i,j,k}^n + W_{Lz\ i,j,k}^n.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Yangi qadamdagi bosim  $P_{i,j,k}^{n+1}$  ni topish uchun (18) - tenglamani qayta yozamiz:

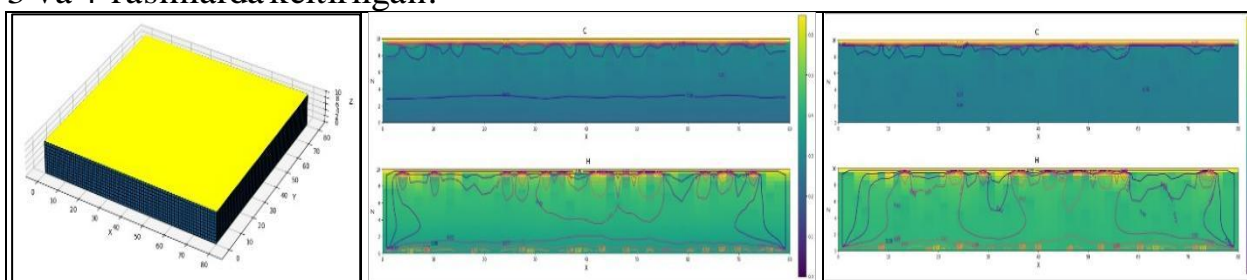
$$\begin{aligned}
 P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t^n \rho g}{S_{save}} \left[ \frac{k_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \left( \frac{P_{i+1,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta x^2} - \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i-1,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta x^2} + \frac{k_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \left( \frac{P_{i,j+1,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta y^2} - \right. \\
 \left. - \frac{k_{i,j-\frac{1}{2},k}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j-1,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta y^2} + \frac{k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left( \frac{P_{i,j,k+1}^n}{\rho g} + z_{k+1} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta z^2} - \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k-1}^n}{\rho g} - z_{k-1} \right)}{\Delta z^2} + W_{c\ i,j,k}^n + W_{Lz\ i,j,k}^n \right]
 \end{aligned}$$

Qo‘yilgan masala uchun iteratsiya usulidan foydalanib yaqinlashish quydagi shart bilan tekshirib boriladi:

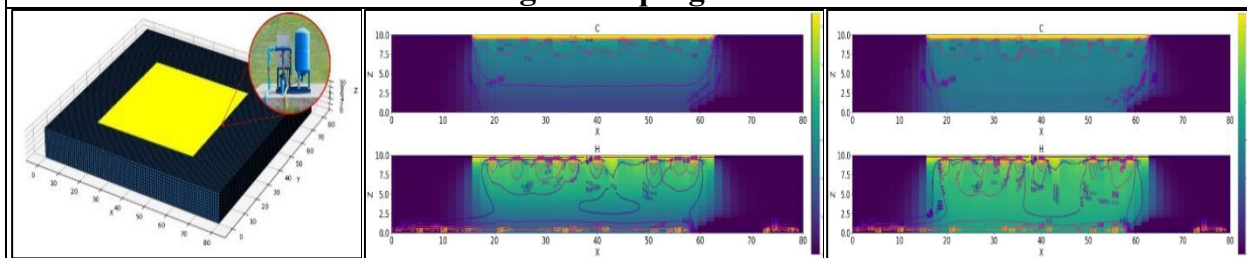
$$\max |C^{r+1} - C^r| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon = 0.001$$

bu yerda:  $r$  – iteratsiyalar soni,  $\varepsilon$  – iteratsion jarayonning aniqligi (0.001).

3.3.-paragrafida, takroriy ekin ekiladigan hududlarning yer osti suvlarini harakatining takomillashtirilgan matematik model uchun sonli tajriba natijalari 3 va 4-rasmlarda keltirilgan:



3-rasm. Hududga to‘liq sug‘orish suvi berish

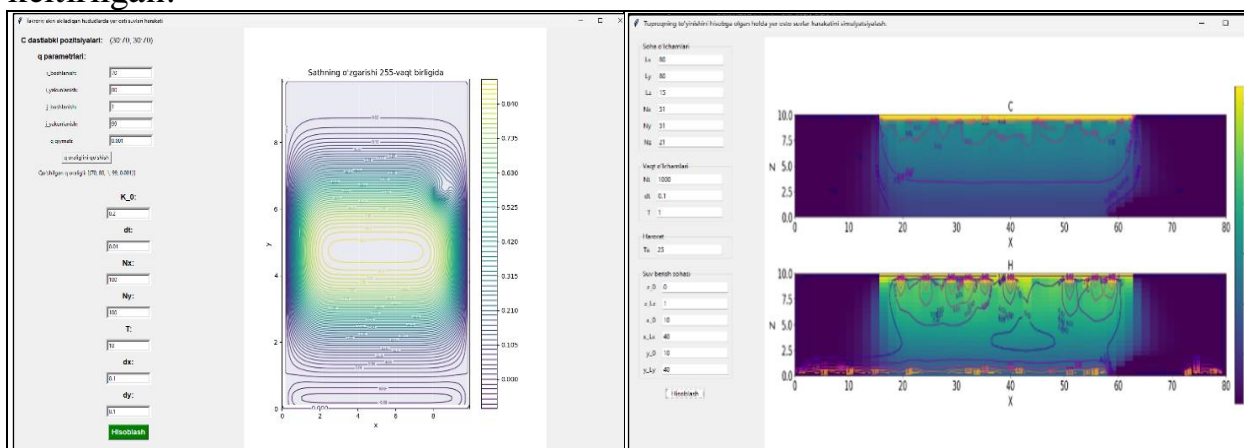


4-rasm. Hududga qisman sug‘orish suvi berish hamda drinaj(nasos) orqali suv olish

Dissertatsiya ishining **“Takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvlari sath o‘zgarishini tadqiq qilish dasturiy majmui hamda natijalar tahlili”** deb nomlagan to‘rtinchi bobida II va III boblarda keltirilgan matematik modellarning samarali hisoblash algoritmlari asosida dasturiy majmua ishlab chiqish va tajribaviy tadqiqot natijalarining bayoniga bag‘ishlangan. Dasturiy majmua yer osti suvlari sathi o‘zgarishini bashoratlashga bag‘ishlangan bo‘lib, bir-birini to‘ldiruvchi qator dasturiy vositalarni o‘z ichiga olgan. Dasturiy majmua yordamida hisoblash tajribalari o‘tkazilgan va olingan natijalarning tahlili keltirilgan.

4.1. va 4.2-paragraflarda, takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvlar sathi o‘zgarishini tadqiq qilish dasturlar majmui uchun algoritmlar va ta‘minotlar keltirilgan. Mazkur tadqiqotlar doirasida **“Takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvlari harakati”** va **“Sug‘oriladigan hududlarda yer osti suvlari sathini bashoratlash”** kabi matematik modellar asosida ishlovchi sonli hisoblash algoritmlari ishlab chiqilgan.

Quyida matematik modellarning sonli hisoblash algoritmlari uchun yozilgan dasturiy ta‘minotlar berilgan. 5-rasmda dastlabgi takomillashtirilgan model uchun va 6-rasmda ishlab chiqilgan model uchun dasturiy ta‘minotlarning interfeysi keltirilgan.

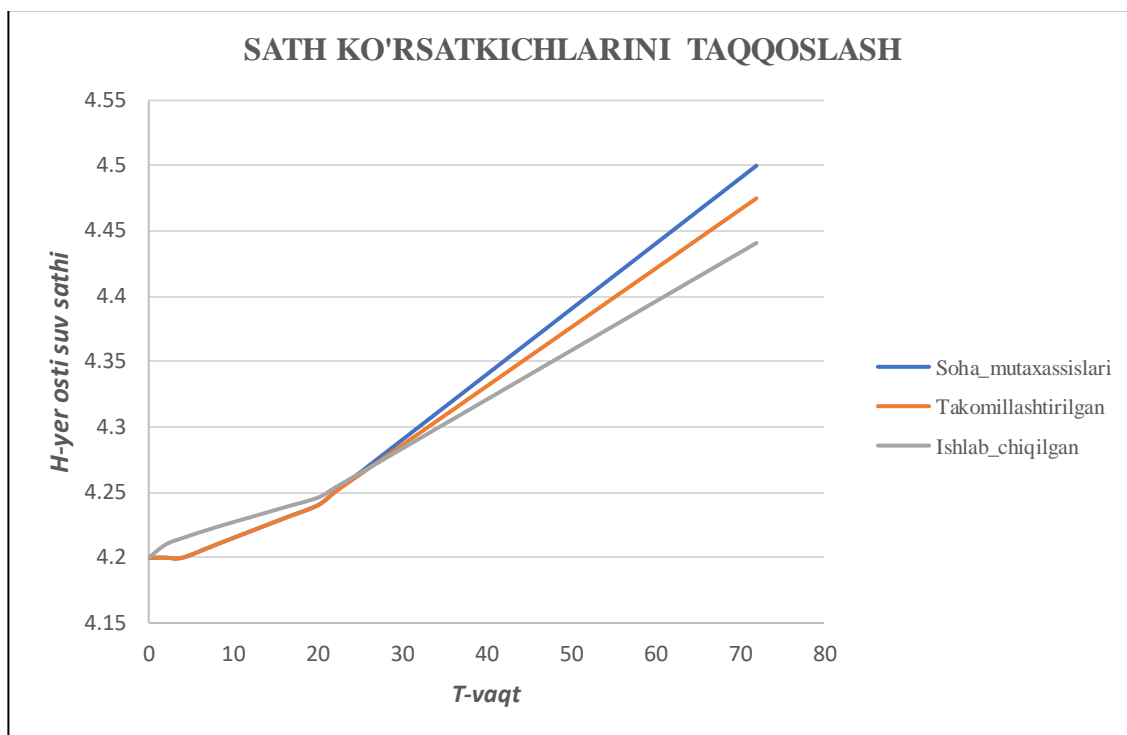


**5-rasm. “Takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvlari harakati” dasturiy taminoti**

**6-rasm. “Sug‘oriladigan hududlarda yer osti suvlari sathini bashoratlash” dasturiy taminoti**

Ishlab chiqilgan dasturlar matematik modellashtirish, simulyatsiya hamda grafik vizualizatsiya kabi jarayonlarni amalga oshirish uchun bir nechta maxsus taminotlardan foydalanilgan.

4.3.-paragrafida, ishlab chiqilgan model va dasturiy majmualar yordamida hisoblash tajribalarni o‘tkazish hamda natijalarni tahlil qilish 7-rasmda keltirilgan. Tahlil natijalari shuni ko‘rsatdiki:



**7-rasm. Sath ko'rsatkichlarini taqqoslash**

Soha mutahassislari bizga taqdim etgan ma'lumotlarni ko'radigan bo'lsak, maydon sug'orilgandan keyin 72 soat kuzatish natijalari shuni ko'rsatdiki, dastlabki suv sathi 4.2 m edi. 5.75 soatdan keyin sug'orish suvi sathga yetib kelishni boshladi va eksponensial ko'zgara boshlagan. Natijada yer osti suv sathi 72 soatda 4.5 m ga erishgan. Takomillashtirilgan model natijalariga qaraydigan bo'lsak, dasturiy majmuadan olingan natijalar, dastlabki 4.2 m sath to'g'ridan-to'g'ri eksponensial holatda o'zgara boshladi va 72 soat davomida 4.4 m holatgacha ko'tarildi. Yaratilgan ikkinchi model natijalarini tahlil qiladigan bo'lsak, unda 4.2 m sathga 6.2 saotdan keyin sug'orish suvi yer osti suviga ta'sir qilgan hamda undan keyin eksponensial ta'sir qila boshlagan, natijada sath 4.75 m gacha ko'tarilgan.

## XULOSA

**“Takroriy ekin ekiladigan hududlarda geofiltratsiya jarayonlarini matematik modellashtirish”** mavzusida olib borilgan dissertatsiya tadqiqotining asosiy natijalari quyidagilardan iborat:

1. Yer osti suvlarining sizilishi va namlik o‘tkazuvchanligi haqidagi xalqaro va milliy adabiyotlar sharhi asosida tahlil qilindi. Geofiltratsiya hududining sxemalashirilishi, yer osti suvini tutuvchi qatlamlarning xususiyatlari hamda suv muvozanatini matematik modellashtirish usullari qo‘yilgan masalaning xususiyatidan kelib chiqib tahlil qilindi va tegishli xulosalar olindi. Hidrogeologik-meliorativ masalalarni yechishda suv muvozanat usulining bosqichlari aniqlandi va g‘ovak muhitning filtratsiya xarakteristikalariga oid ma’lumotlar taqdim etildi.

2. Yer osti suvlarining harakati va sathini bashoratlash uchun matematik model takomillashtirildi. Takomillashtirilgan model yer osti suvlarining harakat tezligi va g‘ovak muhitdagi suv konsentratsiyasini aniqlash imkonini beradi. Model sug‘orish tizimlarini boshqarish, suv resurslarini tejash, va ekologik muammolarni hal qilishda samarali hisoblanadi.

3. Takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvlarini filtratsiyasi jarayonlarini sonli modellashtirish uchun xususiy hosilali tenglamalar asosida sonli model tuzilgan va uni yechishda chekli ayirmalar, progonka hamda iteratsiya usullari qo‘llanildi. Model yer osti filtratsiyasi, sug‘orish, suv zahirasi va suv sathini boshqarishda samarali yechimlarni taqdim etadi.

4. Yer osti suvlarining harakati va sathini bashoratlash uchun matematik model hamda tuproq parametrlariga asoslangan axborot modeli ishlab chiqildi. Ushbu model sug‘orish, temperatura, sho‘rlanish va boshqa ma’lumotlarni o‘zgartirib, axborot tizimi orqali avtomatik boshqarishni ta’minlaydi. Model tuproqning fizik xususiyatlari, suv oqimi va yer osti sharoitlarini hisobga olib, suvning harakati va yer osti suvlari sathini bashorat qilishga imkon beradi.

5. Darsi qonuni va konveksiya-diffuziya tenglamalari asosida suvning oqimi va tarqalishini aniq bashorat qilishga erishildi, bu esa suv resurslarini tejash va ekologik muammolarni hal qilishda samarali tavsiyalar ishlab chiqishga xizmat qiladi.

6. Takroriy ekin ekiladigan va sug‘oriladigan hududlarda yer osti suvlari harakatini va sathini bashorat qilish uchun samarali hisoblash algoritmlari ishlab chiqildi. Ushbu algoritmlar asosida dasturiy majmua yaratildi va uni amaliy masalalarda qo‘llash yo‘riqnomasi ishlab chiqildi. Sonli tajribalar o‘tkazilib, natijalar tahlil qilindi. Dasturiy majmua modullilik tamoyili asosida ishlab chiqilib, aniq obyektlarga tatbiq etildi va samaradorligi tasdiqlandi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13.30.12.2021.Т.142.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫЕ СТЕПЕНИ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ  
ИНСТИТУТЕ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И  
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

---

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РАЗВИТИЯ  
ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**МУРОДУЛЛАЕВ БАХТИЁР ТУЛКИН УГЛИ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ГЕОФИЛЬТРАЦИИ В РАЙОНАХ С ПОВТОРНЫМ ПОСЕВОМ**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

Ташкент - 2025

**Тема диссертация доктора (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан под номером B2024.1.PhD/T4421.**

Диссертация выполнена в Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Автореферат диссертации размещён на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) на сайте Научного совета ([www.airi.uz](http://www.airi.uz)) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:** **Хабибуллаев Иброхим**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Рахмонов Зафар Равшанович**  
доктор физико-математических наук, доцент

**Далиев Шерзод Каршиевич**  
доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент

**Ведущая организация:** **Каршинский государственный университет**


Защита диссертации состоится « 31 » января 2025 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DCs.13.30.12.2021.T.142.01 при Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо Улугбекский р-н, Буз-2, 17А Тел.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz))


С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Научно-исследовательского институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта (регистрационный номер № 52 ). (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо Улугбекский р-н, Буз-2, 17А Тел.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz)).

Автореферат диссертации разослан « 19 » января 2025 года.  
(реестр протокола рассылки № 20 от « 16 » декабря 2024 года)



  
**Н. Равшанов**  
Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор

  
**Ф.М. Нуралиев**  
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор

  
**Э.Ш. Назирова**  
Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор

## **Введение (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В условиях бурного развития мировой экономики становится актуальным точное определение многих научных исследований и различных прикладных задач народного хозяйства на основе математического моделирования, численных методов и комплекса программ и вычислительных экспериментов. Если решением проблемы обеспечения продуктами питания растущего населения является выращивание повторных культур, большое внимание уделяется орошению полей, мелиорации земель и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Поэтому в сфере гидрогеологии и ирригации растет потребность в цифровых технологиях и методах искусственного интеллекта, позволяющих создавать геофильтрационные модели динамически изменяющихся систем, предоставлять информацию и эффективно исследовать сложные процессы. В большинстве странах мира, включая США, Германию, Данию, Францию, Китай, Индию, Пакистан, Японию, Российскую Федерацию и многие другие страны, широко применяются методы математического моделирования сложных процессов геофильтрации, численных решений и создания комплексов программ.

Развитие гидрогеологических исследований в мире характеризуется увеличением роли численных методов и математического моделирования процессов геофильтрации и геомиграции. Удовлетворение постоянно растущих требований к достоверности и точности заранее заданных расчетов подчеркивает важность прикладной математики и моделирования, а также рационального использования залежей подземных вод, математического моделированию процессов геофильтрации в районах с повторным посевом, использованию высокотехнологичных программных средств и большое внимание уделяется совершенствованию научных и практических методов.

В нашей Республике уделяется особое внимание разработке мер по совершенствованию и внедрению математических моделей сложных гидродинамических процессов, связанных с оценкой состояния, мониторингом и прогнозированием подземных водных ресурсов, имеющих важное значение в геологии, водной и сельскохозяйственной деятельности. В частности, в стратегии развития Республики Узбекистан определены задачи «определенных в Стратегии развития сельского хозяйства Республики Узбекистан на 2020-2030 годы, созданию системы постоянного контроля и наблюдения за кратковременными посадками, поливами, уходом и агротехническими мероприятиями быстрорастущих сортов сельскохозяйственных культур повторного посева на площадях, освобожденных от зерновых культур путем эффективного использования имеющихся ресурсов, а также научных исследований, применения результатов на практике»<sup>2</sup> Успешное решение этих задач важно для

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан «Об утверждении Стратегии развития сельского хозяйства Республики Узбекистан на 2020-2030 годы»

мониторинга, анализа и эффективного использования сложных гидрогеологических систем, разработки математической модели, алгоритма и программных средств нестационарного процесса геофильтрации.

В соответствующих указах Президента Республики Узбекистан также подчеркивается важность данных вопросов. В частности, Указ Президента №ПФ-5349 от 19 февраля 2018 года “О мерах по дальнейшему совершенствованию сферы информационных технологий и коммуникаций”, Указ №ПФ-158 от 11 сентября 2023 года О Стратегии “Узбекистан – 2030” и соответствующее решение хакима Кашкадарьинской области от 1 апреля 2019 года определили прогнозные показатели для повторного посева на освобожденных от зерновых культур полях в области, а также поставили задачи, указанные в других нормативных документах. Настоящее диссертационное исследование в определенной степени способствует выполнению этих задач.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий».

**Степень изученности проблемы.** Математическое моделирование процессов геофильтрации и геомиграции и анализ научной литературы по изучению движения подземных вод на территориях посевов повторных культур на основе численных методов показали, что в этом направлении получен ряд значимых теоретических и практических результатов. Фундаментальным аспектам математического моделирования процессов подземной гидродинамики посвящены научные работы А.Дарси, Ф.Форхгеймера, Ж.Дюпюи, Ж.Буссинеска, Н.Ю.Жуковского и других зарубежных ученых. Полубаринова-Кочина, В.И.Аравина, С.Н.Нумеров, Г.Н.Каменск, А.И.Силина-Бекчурин, П.П.Климентов, Г.Б.Пихачев, В.А.Мироненко, И.К.Гавич, В.Н.Шелкачев, М.А.Гусейн-заде, В.М.Шестаков, Н.Н.Веригин, И.А.Чарний, Ф.М.Бочеввер, М.С.Сантуш, С.Е.Якоб, К.Э.Леви, с, П.Дж.Монтейро, Ч.Х.Райкрофт, Г.И.Баренблатт, Т.В.Пацек, Д.Б.Силин, М. Чрайби, С. Залески, Ф. Франко, К. Аткинсон, Р.А.Сангулов, М.Х.Хамдан, Дж. Беар, А. Верруйт, Т.П.Клемент, GFPinder, WGGray, TEREilly, А.В.Харбо, Р.Дж. Хант, К. Чжэн , В. Кинцель, Г.Д.Беннетт, Д.А.Бенсон, Р.Ф.Карсел, Р.С.Парриш, М.М.Мейершайерт и другие исследователи внесли большой вклад в создание математических моделей процессов изменения уровня и минерализации подземных вод.

В Узбекистане значимых научных результатов в разработке математических моделей гидродинамики и геофильтрационных процессов добились Ф.Б.Абуталиев, Р.Саъдуллаев, Ж.Ф.Файзуллаев, Н.Мухидинов, М.М.Орипов, Р.Н.Усмонов, Н.Равшанов, И.Хабибуллаев, Ж.Х.Джуманов, Э.Ш.Назирова, А.Неъматов, Ш.Далиев, Х.Эгамбердиев и другие ученые.



На сегодняшний день проявляются проблемы интеграции методов комплексного анализа на основе расчетных экспериментов и математического моделирования фильтрационных процессов с учетом элементов порядка, особенностей распределения гидрогеологических процессов по регионам и мониторинга состояния подземных вод.

Требуется разработать информационную систему для орошаемых участков в зонах с повторным посевом, которая принимает частные параметры каждого участка и рассчитывает адекватные физические характеристики процесса с учетом пространства и времени. Также необходимо разработать алгоритм, который, используя предлагаемую математическую модель, будет предоставлять высокоточные данные о движении и уровне подземных вод.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада Ал-Хоразмий в рамках научного проекта У-АТ-2021-493 “Создание инновационного устройства для дистанционного определения уровня, температуры и электропроводности подземных вод” (2021-2023).

**Целью исследования** является разработка и усовершенствование математических моделей, численных алгоритмов и программного обеспечения для прогнозирования изменения уровня грунтовых вод с учетом режимов орошения на площадях повторных посевов.

**Задачи исследования:**

проведение анализа научных работ зарубежных и отечественных ученых, посвященных исследованию процессов влияния оросительных вод на подземные воды;

разработка информационной модели изучаемого геофильтрационного процесса;

усовершенствование математической модели, описывающей изменение уровня подземных вод в результате орошения и процессов воздействия элементов баланса в подземном водоносном горизонте, и разработка численного алгоритма решения задачи;

разработка математической модели процесса насыщения зоны аэрации и ее распространения в результате изменения режима орошения, а также примыкания поливных вод к уровню грунтовых вод и насыщения их слоя и эффективного численного алгоритма его решения;

разработка программного средства для прогнозирования изменения уровня подземных вод с учетом режимов орошения на посевах повторных культур.

**Объектом исследования** являются процессы геофильтрации и геомиграции в зависимости от физических свойств подземных вод.

**Предметом исследования** являются математическая модель, численные алгоритмы и программные комплексы для проведения расчетов на ЭВМ условий формирования подземных вод в районах посева повторных культур.

**Методы исследования.** В процессе выполнения диссертационной работы использованы методы вычислительной математики, математического моделирования и вычислительного эксперимента, численные методы, системный анализ и технологии объектно-ориентированное программирование для разработки программных комплексов.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

усовершенствована математическая модель процессов геофильтрации, описывающая изменение уровня грунтовых вод в результате орошения и факторного влияния элементов баланса водоносного слоя;

разработана математическая модель процесса распределения воды, примыкания к уровню грунтовых вод и насыщения слоя в результате насыщения зоны аэрации и изменения режима орошения повторных культур;

разработаны математический модель процессов геофильтрации и геомиграции гидрогеологически связанных водоносных горизонтов и его численные решения а также эффективные алгоритмы реализации;

разработан алгоритм расчета, обновляющий на каждом шаге общей временной интеграции коэффициенты модели, созданной с учетом физических свойств полей, предназначенных для повторных посевов.

**Практические результаты исследования:**

разработаны численные решения и эффективные алгоритмы математической модели позволяющий прогнозирования движения и уровня подземных вод на землях с повторными посевом;

разработан алгоритм и программный комплекс позволяющий рассчитать коэффициентов разработанной модели с учетом насыщения зоны аэрации и физических свойств земель с повторным посевом на каждом шаге общей временной интеграции;

на основе моделирования с учетом процессов конвекции и диффузии воды определены скорости движения и концентрация подземных вод, температура, степень насыщенности почвы, коэффициент проницаемости, а также разработаны практические рекомендации по проведению мелиоративных мероприятий.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования подтверждается детальными математическими выражениями, сохранением массы и строгим соответствием закону А. Дарси. Задача адекватности модели реализована путем сведения разности элементов объекта к минимуму, результаты численных экспериментов-расчетов сопоставлены с данными измерительно-наблюдательного мониторинга, устойчивость и сходимость вычислительного процесса, результаты расчетов не противоречат характеру изучаемых процессов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования объясняется научным

обобщением математического моделирования в гидрогеологических системах, оценкой изменения процессов геофильтрации подземных вод под влиянием природным и антропогенным воздействием, а также информационным обеспечением показателей фильтрации подземных вод и разработкой экспериментальных методов расчета.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке эффективных алгоритмов и программных средств оценки состояния уровня грунтовых вод на основе различных начальных и граничных условий в однослойных пористых средах в зонах посева повторных культур наряду с процессами геофильтрации в подземной гидросфере, что сокращает время расчета и характеризуется повышением точности инженерных расчетов для определения уровня подземных вод.

**Внедрение результатов исследования.** На основе математических моделей и эффективных численных алгоритмов расчета процессов совместной и взаимосвязанной геофильтрации подземных и поверхностных вод на территориях посевов повторных культур:

с учётом усовершенствованной математической модели процессов геофильтрации, описывающей изменений уровня подземных вод в результате орошения и факторов влияния элементов баланса водоносного слоя, а также математической модели процесса насыщения аэрационной зоны внедрены в «Управлении насосных станций и энергетики при Аму-Кашкадарьинском БУИС.» (Справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан от 30 октября 2024 года No 05/13-4053). В результате ведение мониторинга подземной гидросферы в условиях сложного гидрогеологического и водного дефицита повысило мелиоративную эффективность водоснабжения на 4-7%; на основе мероприятий по поддержанию уровня подземных вод в норме создана возможность увеличения урожайности сельскохозяйственных культур на 2-5%;

численные решения и эффективные алгоритмы реализации математической модели процессов геофильтрации и геомиграции гидрогеологически связанных водоносных слоев, а также алгоритм и программный комплекс для расчета коэффициентов разработанной модели на каждом шагу при интеграции общего времени внедрены в “Касби ирригация бўлими” (Отдел ирригации Касби) (Справка Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан от 30 октября 2024 года No 05/13-4053). Внедрение результатов позволило сформировать систему мониторинга и принятия эффективных управленческих решений о состоянии изменения водохозяйственных условий в подземной гидросфере.

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного диссертационного исследования были обсуждены на 5 международных и 8 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 34 научных работ, из них 12 научных статей, в том числе 1 в зарубежных научных изданиях рекомендованных со стороны Высшая

аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций и 18 в республиканских журналах, а также получены 4 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Объем диссертации составляет 118 страниц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, изложены его научная новизна и практические результаты, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты их теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, а также об опубликованности результатов исследования и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **“Научно-теоретические основы математического моделирования геофильтрационных процессов в районах посева повторных культур”** проанализирована международная и отечественная научная литература по математическому моделированию геофильтрационных процессов в районах посева повторных культур. Приведены примеры на основе математических моделей, разработанных для прогнозирования уровня подземных вод на орошаемых территориях. В параграфе 1.1 подчеркивается важность системного подхода и методов математического моделирования для анализа и управления мелиоративными состояниями посевов повторных культур. В параграфе 1.2 изучены зарубежный и отечественный опыт, проанализированы научные статьи на платформе Web of Science. В параграфе 1.3 при моделировании подземных вод учитываются изменения структуры подземного водоносного горизонта, водопроницаемости, испарения и орошения. Рассмотрено также взаимодействие гидрографической сети и подземных вод.

Во второй главе диссертации под названием **“Совершенствование математической и численной модели движения грунтовых вод на территориях посевов повторных культур”** рассмотрены вопросы совершенствования математической и численной модели грунтовых вод на территориях посевов повторных культур. Составлена подробная информационная модель основных показателей подземных вод, оросительной воды, факторов фильтрации и водных ресурсов. Проанализированы эксплуатационные процессы подземных вод в Касбинском районе, результаты режимных наблюдений, изучены вопросы прогнозирования изменения уровня воды, определения мест фильтрации и их количества. Также усовершенствована математическая модель процессов геофильтрации грунтовых вод в районах посева повторных культур.

В параграфе 2.1 рассмотрены вопросы формирования информационного обеспечения с учетом физических свойств орошаемых площадей и влияющих факторов для прогнозирования уровня грунтовых вод на территориях, где возделываются повторные культуры, и на этой основе получение решений во времени и пространстве с помощью математического моделирования и численных методов. Исследовано повышение плодородия почв и использование неиспользуемых земель посредством мелиоративных работ. На примере Касбинского района создано информационное обеспечение на основе прогнозирования движения подземных вод с помощью геофильтрационной модели, анализа физических и мелиоративных особенностей территории, а также водного баланса и других факторов.

В параграфе 2.2 усовершенствована математическая модель, описывающая движение подземных вод в районах посева повторных культур. Уровень грунтовых вод в водоносном слое рассматривается относительно нижнего горизонтального водонепроницаемого слоя, и это движение выражается нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных параболического типа, которое имеет следующий вид:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W \quad (1)$$

со следующими начальными и граничными условиями:

$$h(x, y, 0) = h_0(x, y), \quad (2)$$

$$kh \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\lambda(h-h_0), \quad kh \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=L} = \lambda(h-h_0), \quad (3)$$

$$kh \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\lambda(h-h_0), \quad kh \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{y=L} = \lambda(h-h_0), \quad (4)$$

где:  $h_0$  - начальное значение уровня грунтовых вод;  $\lambda$  - коэффициент массообмена через границу расчета;  $t_0$  - начальное время;  $\mu$  - водоотдаточная способность водоносного слоя (безразмерное значение);  $h = h(x, y, t)$  - значение уровня подземных вод от водонепроницаемого слоя до поверхности земли;  $x, y$  - координаты плоскости;  $t$  - время, сутки;  $k = k(x, y, t)$  - коэффициент фильтрации, который выражается следующим образом:

$$k(x, y, t) = k_0(x, y) \frac{h(x, y, t) + h_0(x, y)}{2h(x, y, t)},$$

здесь:  $k_0$  - начальное значение коэффициента фильтрации;  $h_0$  - начальный уровень подземных вод;  $W$  - алгебраическая сумма свободных членов и ее выражение:

$$W = \delta_k \eta_k Q_k - \delta_b \eta_b Q_b - \delta_d \eta_d Q_d - \delta_z \eta_z Q_z + \delta_{in} \eta_{in} Q_{in} + \delta_s \eta_s Q_s;$$

где:  $\delta$  - дельта функция деракта;  $\delta_m = \begin{cases} x = x_m, y = y_m, & 1 \\ x \neq x_m, y \neq y_m, & 0 \end{cases}; m \in [k, b, d, z, in, s];$

$\eta$  - коэффициент перевода модели в измеримый вид (коэффициент массообмена равенств);  $Q_d$  - количество подземных вод;  $Q_b$  - испарение с поверхности;  $Q_{in}$  - инфильтрационное насыщение подземных вод

атмосферными осадками;  $Q_k$  - впитывание воды из каналов в грунт;  $Q_z$  - вынос подземных вод (в канавы);  $Q_s$  - количество воды, подаваемой в орошаемый период.

Для решения поставленной задачи необходимо:

$$h^* = \frac{h}{h_0}, k^* = \frac{k}{k_0}, x^* = \frac{x}{L}, y^* = \frac{y}{L}, \tau = \frac{k_0 h_0}{\mu L^2} t,$$

$$\eta_{in} = \frac{2L^2}{k_0 h_0^2}, \eta_b = \frac{2L^2}{k_0 h_0^2}, \eta_d = \frac{2L}{k_0 h_0^2}, \eta_r = \frac{2L}{k_0 h_0^2}, \eta_z = \frac{2L}{k_0 h_0^2}, \eta_s = \frac{L^2}{k_0 h_0^2}.$$

введем безразмерные величины. Тогда математическая модель и соответствующие граничные условия процесса изменения уровня грунтовых вод (1) - (4) выражаются следующим образом:

$$\frac{1}{\tilde{h}} \frac{\partial h^{*2}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k^* \frac{\partial h^{*2}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k^* \frac{\partial h^{*2}}{\partial y} \right) + 2W^*, \quad (5)$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{L} k^* h^* \frac{\partial h^*}{\partial x} \Big|_{x^*=0} = -\lambda(h_0 h^* - h_0), \quad \frac{k_0 h_0^2}{L} k^* h^* \frac{\partial h^*}{\partial x} \Big|_{x^*=1} = \lambda(h_0 h^* - h_0), \quad (6)$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{L} k^* h^* \frac{\partial h^*}{\partial y} \Big|_{y^*=0} = -\lambda(h_0 h^* - h_0), \quad \frac{k_0 h_0^2}{L} k^* h^* \frac{\partial h^*}{\partial y} \Big|_{y^*=1} = \lambda(h_0 h^* - h_0), \quad (7)$$

Для упрощения опускаем знак «\*» в уравнении (5) и граничных условиях (6)-(7), и записываем уравнение в следующем виде:

$$\frac{1}{\tilde{h}} \frac{\partial h^2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) + 2W, \quad (8)$$

пусть начальное время  $\tau = \tau_0$ . Тогда начальные и граничные условия:

$$h|_{\tau=\tau_0} = h_0,$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{L} k h \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\lambda(h_0 h - h_0), \quad \frac{k_0 h_0^2}{L} k h \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=1} = \lambda(h_0 h - h_0), \quad (9)$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{L} k h \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\lambda(h_0 h - h_0), \quad \frac{k_0 h_0^2}{L} k h \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{y=1} = \lambda(h_0 h - h_0). \quad (10)$$

В параграфе 2.3 представлено усовершенствование математической модели движения подземных вод на территориях с повторными посевами и приведено ее численное решение.

Поскольку задачи (1) и (8) представлены системами нелинейных дифференциальных уравнений, их решение аналитическим методом является сложным. Поэтому для нахождения решений рассматриваемых задач мы используем численные методы. Для численного решения задач (1) - (4) применяем метод конечных разностей. Для этого вводим сетку в область  $D = \{0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq t \leq N\}$ , где  $N$  - максимальное время рассматриваемого процесса,  $[0,1]$  и  $[0,1]$  - интервалы области  $D$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  - шаги, разделяем  $[0, N]$  на шаг  $\Delta \tau$  и получаем следующую сетку:

$$\omega_{\Delta x, \Delta y, \Delta \tau} = \{x = i\Delta x; i = 0, 1, 2, \dots, I; y = j\Delta y; j = 0, 1, 2, \dots, J; t_n = n\Delta \tau; n = 0, 1, 2, \dots, N\},$$

Аппроксимируя уравнение (8) в слое  $n + \frac{1}{2}$  и граничные условия (9) - (10) с применением неявной схемы на сетке  $\omega_{\Delta x, \Delta y, \Delta \tau}$ , получаем следующие конечно-разностные уравнения:

$$\frac{1}{\tilde{h}_{i,j}} \frac{(h^2)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (h^2)_{i,j}^n}{0.5\Delta\tau} = \frac{k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}}(h^2)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} - \frac{(k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}})(h^2)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}}(h^2)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{k_{i,j-0.5}^n(h^2)_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} - \frac{(k_{i,j-0.5}^n + k_{i,j+0.5}^n)(h^2)_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \frac{k_{i,j+0.5}^n(h^2)_{i,j+1}^n}{\Delta y^2} + 2W_{i,j}^n. \quad (11)$$

Уравнение (12) запишем как  $h^2 \approx 2\tilde{h}h - \tilde{h}^2$  относительно квадрата функции уровня. После приведения подобных членов выражаем их в виде системы алгебраических уравнений:

$$\text{В направлении } Ox: \quad a_{i,j} h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j} h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -d_{i,j}, \quad (12)$$

$$\text{где: } a_{i,j} = \frac{2k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i-1,j}}{\Delta x^2}, \quad b_{i,j} = \frac{2 \left( k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \tilde{h}_{i,j}}{\Delta x^2} - \frac{4}{\Delta\tau}, \quad c_{i,j} = \frac{2k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i+1,j}}{\Delta x^2},$$

$$d_{i,j} = \left( \frac{4}{\Delta\tau} - \frac{2(k_{i,j-0.5}^n + k_{i,j+0.5}^n) \tilde{h}_{i,j}}{\Delta y^2} \right) h_{i,j}^n + \frac{2k_{i,j-0.5}^n \tilde{h}_{i,j-1}}{\Delta y^2} h_{i,j-1}^n +$$

$$+ \frac{2k_{i,j+0.5}^n \tilde{h}_{i,j+1}}{\Delta y^2} h_{i,j+1}^n - \frac{k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i-1,j}^2}{\Delta x^2} + \frac{\left( k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \tilde{h}_{i,j}^2}{\Delta x^2} - \frac{k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i+1,j}^2}{\Delta x^2} -$$

$$- \frac{k_{i,j-0.5}^n \tilde{h}_{i,j-1}^2}{\Delta y^2} + \frac{(k_{i,j-0.5}^n + k_{i,j+0.5}^n) \tilde{h}_{i,j}^2}{\Delta y^2} - \frac{k_{i,j+0.5}^n \tilde{h}_{i,j+1}^2}{\Delta y^2} + 2W_{i,j}^n.$$

$$\text{В направлении } Oy: \quad \bar{a}_{i,j} h_{i,j-1}^{n+1} - \bar{b}_{i,j} h_{i,j}^{n+1} + \bar{c}_{i,j} h_{i,j+1}^{n+1} = -\bar{d}_{i,j}, \quad (13)$$

$$\text{где: } \bar{a}_{i,j} = \frac{2k_{i,j-0.5}^{n+1} \tilde{h}_{i,j-1}}{\Delta y^2}, \quad \bar{b}_{i,j} = \frac{2 \left( k_{i,j-0.5}^{n+1} + k_{i,j+0.5}^{n+1} \right) \tilde{h}_{i,j}}{\Delta y^2} - \frac{4}{\Delta\tau}, \quad \bar{c}_{i,j} = \frac{2k_{i,j+0.5}^{n+1} \tilde{h}_{i,j+1}}{\Delta y^2},$$

$$\bar{d}_{i,j} = \left( \frac{4}{\Delta\tau} - \frac{2 \left( k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \tilde{h}_{i,j}}{\Delta x^2} \right) h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{2k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i-1,j}}{\Delta x^2} h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} +$$

$$+ \frac{2k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i+1,j}}{\Delta x^2} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i-1,j}^2}{\Delta x^2} + \frac{\left( k_{i-0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} + k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \tilde{h}_{i,j}^2}{\Delta x^2} - \frac{k_{i+0.5,j}^{n+\frac{1}{2}} \tilde{h}_{i+1,j}^2}{\Delta x^2} -$$

$$- \frac{k_{i,j-0.5}^{n+1} \tilde{h}_{i,j-1}^2}{\Delta y^2} + \frac{(k_{i,j-0.5}^{n+1} + k_{i,j+0.5}^{n+1}) \tilde{h}_{i,j}^2}{\Delta y^2} - \frac{k_{i,j+0.5}^{n+1} \tilde{h}_{i,j+1}^2}{\Delta y^2} + 2W_{i,j}^{n+\frac{1}{2}},$$

Уравнения (13) и (14) вычисляем, используя метод прогонки:

В направлении  $Ox$ : 
$$h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \alpha_{i+1,j} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + \beta_{i+1,j},$$

В направлении  $Oy$ : 
$$h_{i,j}^{n+1} = \bar{\alpha}_{i,j+1} h_{i,j+1}^{n+1} + \bar{\beta}_{i,j+1},$$

используя рекуррентные формулы (15) и (16), заменим  $i$  на  $i-1$ , а  $j$  на  $j-1$ , чтобы найти  $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \bar{\alpha}_{i,j}, \bar{\beta}_{i,j}$ :

$$h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = \alpha_{i,j} h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \beta_{i,j}, \quad h_{i,j-1}^{n+1} = \bar{\alpha}_{i,j} h_{i,j}^{n+1} + \bar{\beta}_{i,j},$$

где:  $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \bar{\alpha}_{i,j}, \bar{\beta}_{i,j}$  прогоночные коэффициенты, а для нахождения прогоночных коэффициентов для направлений  $Ox, Oy$  после расчетов используем следующие рекурренты:

$$\alpha_i = \frac{c_{i-1,j}}{b_{i-1,j} - a_{i-1,j} \alpha_{i-1,j}}, \quad \beta_i = \frac{d_{i-1,j} + a_{i-1,j} \beta_{i-1,j}}{b_{i-1,j} - a_{i-1,j} \alpha_{i-1,j}},$$

$$\bar{\alpha}_j = \frac{\bar{c}_{i,j-1}}{\bar{b}_{i,j-1} - \bar{a}_{i,j-1} \bar{\alpha}_{i,j-1}}, \quad \bar{\beta}_j = \frac{\bar{d}_{i,j-1} + \bar{a}_{i,j-1} \bar{\beta}_{i,j-1}}{\bar{b}_{i,j-1} - \bar{a}_{i,j-1} \bar{\alpha}_{i,j-1}},$$

аппроксимируем граничные условия, используя неявную схему:

по направлению  $Ox$ : 
$$\frac{k_0 h_0^2}{2L} k_{1,j} \frac{2h_{1,j} h_{1,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{1,j}^2 - 2h_{0,j} h_{0,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{0,j}^2}{\Delta x} = -\lambda(h_0 h_{1,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_0),$$

$$\frac{k_0 h_0^2}{2L} k_{l,j} \frac{2h_{l,j} h_{l,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{l,j}^2 - 2h_{l-1,j} h_{l-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{l-1,j}^2}{\Delta x} = \lambda(h_0 h_{l,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_0),$$

по направлению  $Oy$ : 
$$\frac{k_0 h_0^2}{2L} k_{i,1} \frac{2h_{i,1} h_{i,1}^{n+1} - h_{i,1}^2 - 2h_{i,0} h_{i,0}^{n+1} + h_{i,0}^2}{\Delta y} = -\lambda(h_0 h_{i,1}^{n+1} - h_0),$$

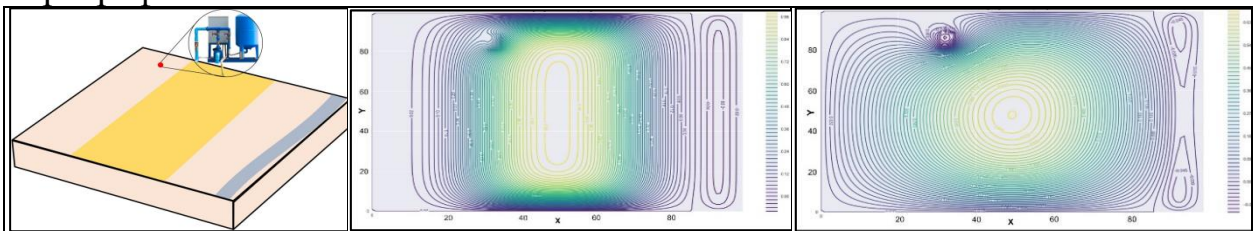
$$\frac{k_0 h_0^2}{2L} k_{i,J} \frac{2h_{i,J} h_{i,J}^{n+1} - h_{i,J}^2 - 2h_{i,J-1} h_{i,J-1}^{n+1} + h_{i,J-1}^2}{\Delta y} = \lambda(h_0 h_{i,J}^{n+1} - h_0).$$

В качестве начального приближения мы берем исходное условие поставленной задачи и проверяем его в итерации (14) следующим образом:

$$\left| (h_{i,j})^{(s+1)} - (h_{i,j})^{(s)} \right| \leq \varepsilon; \quad (14)$$

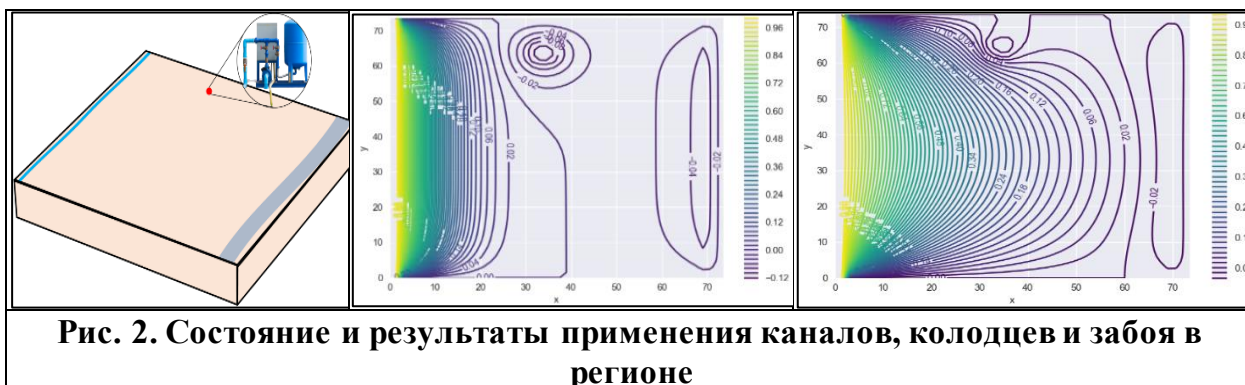
где:  $s$  - количество итераций,  $\varepsilon$  - точность итерационного процесса (0.001).

Рисунки 1 и 2 показывают результаты численных экспериментов по усовершенствованной математической модели движения подземных вод на территориях посевов повторных культур, которые представлены в параграфе 2.3:



**Рис. 1. Состояние и результаты применения скважин и дренажа на орошаемых территориях**





**Рис. 2. Состояние и результаты применения каналов, колодцев и забоя в регионе**

В третьей главе диссертации под названием “**Математическое и численное моделирование процесса геофильтрации в зонах посева повторных культур с учетом физических и мелиоративных особенностей зоны аэрации**” рассмотрено математическое и численное моделирование процесса геофильтрации в зонах посева повторных культур с учетом физических и мелиоративных особенностей зоны аэрации. При построении математической модели с учетом наземных и подземных факторов предложена новая модель, основанная на существующих информационных моделях и литературе. Процесс в основном основан на переносе массы, и предложена математическая модель, учитывающая такие факторы, как скорость потока жидкости, поверхностное натяжение и молекулярная диффузия.

В параграфе 3.1. приведено математическое моделирование процесса геофильтрации на орошаемых посевных площадях с учетом физических особенностей.

Для численного моделирования процесса геофильтрации на орошаемых площадях с учетом физических особенностей предложена следующая математическая модель. Уравнение распределения концентрации воды в среде и изменения давления для выражения уровня в слое:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (1-H) \left( u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) = (1-H) \left( D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + W_C, \quad (15)$$

$$S_{save} \frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho g} + z \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{P}{\rho g} + z \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{P}{\rho g} + z \right) \right) + W_c + W_{Lz}, \quad (16)$$

где:  $C(x, y, z, t)$  - концентрация воды в среде;  $S_{save}$  - коэффициент водоудерживания среды;  $u(x, y, z, t)$ ,  $v(x, y, z, t)$ ,  $w(x, y, z, t)$  - скорости конвекции;  $\rho g$  - плотность воды и ускорение притяжения земли;  $D_x(x, y, z, t)$ ,  $D_y(x, y, z, t)$ ,  $D_z(x, y, z, t)$  - коэффициенты диффузии;  $W_c + W_{Lz}$  - Линия орошения или источника, т.е. количество воды, добавляемой или удаляемой из водоносного слоя с внешней стороны.

$$\Omega = \{ x_i = x_0 + i\Delta x, i = 0, 1, \dots, N_x; y_j = y_0 + j\Delta y, j = 0, 1, \dots, N_y; z_k = z_0 + k\Delta z, k = 0, 1, \dots, N_z, T_n \}$$

для расчета времени используем следующее равенство:  $T_n = \sum_{\tau=0}^n \Delta t_\tau$

Чтобы сохранить устойчивость конечно-разностной схемы, определяем шаг времени следующим образом:

$$\Delta t^n = \min \left( \frac{\Delta x}{u_{max}^n}, \frac{\Delta y}{v_{max}^n}, \frac{\Delta z}{w_{max}^n}, \frac{\Delta x^2}{2D}, \frac{\Delta y^2}{2D}, \frac{\Delta z^2}{2D} \right).$$

Для итерации начального времени (начальные условия).

$$C(x, y, z, t)|_{t=0} = C_0(x, y, z), \quad P(x, y, z, t)|_{t=0} = P_0(x, y, z),$$

Значения концентрации и давления в граничных точках введены следующими равенствами. Для функции  $C$ , выражающей концентрацию:

$$\begin{aligned} x=0, \quad C(0, y, z, t) &= C(x+\Delta x, y, z, t) + (C(x+\Delta x, y, z, t) - C(x+2\Delta x, y, z, t)), \\ x=L_x, \quad C(x, y, z, t) &= C(x-\Delta x, y, z, t) + (C(x-\Delta x, y, z, t) - C(x-2\Delta x, y, z, t)), \\ y=0, \quad C(x, 0, z, t) &= C(x, y+\Delta y, z, t) + (C(x, y+\Delta y, z, t) - C(x, y+2\Delta y, z, t)), \\ y=L_y, \quad C(x, y, z, t) &= C(x, y-\Delta y, z, t) + (C(x, y-\Delta y, z, t) - C(x, y-2\Delta y, z, t)), \\ z=0, \quad C(x, y, 0, t) &= C(x, y, z+\Delta z, t) + (C(x, y, z+\Delta z, t) - C(x, y, z+2\Delta z, t)), \\ z=L_z, \quad C(x, y, z, t) &= W_{L_z}. \end{aligned}$$

Для расчета значений функции давления в предельных точках:

$$\begin{aligned} x=0, \quad P(x, y, z, t) &= P(x+\Delta x, y, z, t) + (P(x+\Delta x, y, z, t) - P(x+2\Delta x, y, z, t)), \\ x=L_x, \quad P(x, y, z, t) &= P(x-\Delta x, y, z, t) + (P(x-\Delta x, y, z, t) - P(x-2\Delta x, y, z, t)), \\ y=0, \quad P(x, y, z, t) &= P(x, y+\Delta y, z, t) + (P(x, y+\Delta y, z, t) - P(x, y+2\Delta y, z, t)), \\ y=L_y, \quad P(x, y, z, t) &= P(x, y-\Delta y, z, t) + (P(x, y-\Delta y, z, t) - P(x, y-2\Delta y, z, t)), \\ z=0, \quad P(x, y, z, t) &= P(x, y, z+\Delta z, t) + (P(x, y, z+\Delta z, t) - P(x, y, z+2\Delta z, t)), \\ z=L_z, \quad P(x, y, z, t) &= P(x, y, z-\Delta z, t) + (P(x, y, z-\Delta z, t) - P(x, y, z-2\Delta z, t)), \end{aligned}$$

Элементы баланса, влияющие на границу и внутри сферы:

$$W_C = \delta_d Q_d + \delta_k Q_k - \delta_z Q_z; \quad W_{L_z} = \delta_{in} Q_{in} - \delta_b Q_b + \delta_s Q_s.$$

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & x = x_m, y = y_m, z = z_m, t = t_m; \\ 0, & x \neq x_m, y \neq y_m, z \neq z_m, t \neq t_m. \end{cases} \quad (m \in [d, k, z, in, b, s])$$

Для определения функции уровня используем следующее соотношение:

$$H(x, y, z, t, C) = \begin{cases} 1, & \begin{cases} C_{max}(x, y, z', t) - C(x, y, z', t) \leq \varepsilon \quad \forall z' \leq z, \\ C_{max}(x, y - \Delta y, z - \Delta z, t) - C(x, y - \Delta y, z - \Delta z, t) \leq \varepsilon, \\ C_{max}(x, y + \Delta y, z - \Delta z, t) - C(x, y + \Delta y, z - \Delta z, t) \leq \varepsilon, \\ C_{max}(x - \Delta x, y, z - \Delta z, t) - C(x - \Delta x, y, z - \Delta z, t) \leq \varepsilon, \\ C_{max}(x + \Delta x, y, z - \Delta z, t) - C(x + \Delta x, y, z - \Delta z, t) \leq \varepsilon. \end{cases} \\ 0. \end{cases}$$

где:  $C_{max}(x, y, z, t)$  - максимальная водоприемная концентрация среды.

Коэффициент проницаемости определяется следующим выражением:

$$k(x, y, z, t) = k_0 \left( 1 + \frac{P(x, y, z, t) - S(x, y, z, t)}{P_0 - S_0} \right) \frac{T(x, y, z)}{T_0} (1 - F(x, y, z, t)),$$

где:  $k_0$  - исходный коэффициент проницаемости;  $P(x, y, z, t)$  - функция давления;  $S(x, y, z, t)$  - степень солености воды;  $T(x, y, z)$  - температура;  $F(x, y, z, t)$  - степень насыщения почвы;  $P_0, S_0, T_0$  - начальное значение коэффициентов.

Согласно закону Дарси, скорости фильтрации жидкости в пористой среде определяются следующим образом:

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Используем функцию логистического роста, которая выражает увеличение степени насыщения почвы и последующее возвращение ее в устойчивое состояние:

$$F(x, y, z, t) = F_{max}(x, y, z) \frac{1}{1 + e^{-k_F(t-t_0)}},$$

где:  $F_{max}$  - максимальная степень насыщения почвы;  $k_F$  - коэффициент насыщения почвы,  $t_0$  - точка инфлексии, т.е. показывает время наиболее быстрого роста процесса насыщения. Изменение степени засоления воды с течением времени определяется следующей функцией:

$$S(x, y, z, t) = S_0(x, y, z) e^{-k_s t},$$

где:  $S_0$  - начальный уровень солености воды;  $k_s$  - коэффициент снижения солености воды.

В параграфе 3.2. представлено численное решение математической модели процесса геофильтрации с учетом физических и мелиоративных особенностей зоны аэрации на территориях, засеянных повторным посевом.

С помощью конечных разностных явных схем дискретизируем уравнение по временной и пространственной координатам. Дискретизация для общего уравнения адвекции-диффузии выполняется следующим образом:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t^n} = (1 - H(x_i, y_j, z_k, T_n, C_{i,j,k}^n)) \left( \begin{array}{l} -u_{i,j,k}^n \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta x} - v_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta y} - \\ -w_{i,j,k}^n \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta z} + D_x \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ + D_y \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{\Delta y^2} + D_z \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2 \cdot C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \end{array} \right) + W_{C_{i,j,k}}^n, \quad (17)$$

где  $u_{i,j,k}$ ,  $v_{i,j,k}$ ,  $w_{i,j,k}$  - компоненты адвекции,  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  - пространственные шаги;  $D_x, D_y, D_z$  - коэффициенты диффузии.

Используя уравнение (17), разделим общее дискретизированное уравнение на известные и неизвестные части для получения его итеративного решения.

$$C_{i,j,k}^{n+1} = C_{i,j,k}^n + \Delta t^n \left( H(x_i, y_j, z_k, T_n, C_{i,j,k}^n) - 1 \right) \left( u_{i,j,k} \frac{C_{i+1,j,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta x} + v_{i,j,k} \frac{C_{i,j+1,k}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta y} + w_{i,j,k} \frac{C_{i,j,k+1}^n - C_{i,j,k}^n}{\Delta z} - D \left( \frac{C_{i+1,j,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \right) + W_{C_{i,j,k}}^n.$$

С помощью уравнения (16) вводим каждый компонент для давления в уравнение, дискретизированное по времени и пространству.

$$\begin{aligned} S_{save} \frac{1}{\rho g} \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t^n} = & \frac{k_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \left( \frac{P_{i+1,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta x^2} - \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i-1,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta x^2} + \\ & + \frac{k_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \left( \frac{P_{i,j+1,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta y^2} - \frac{k_{i,j-\frac{1}{2},k}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j-1,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta y^2} + \\ & + \frac{k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left( \frac{P_{i,j,k+1}^n}{\rho g} + z_{k+1} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta z^2} - \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k-1}^n}{\rho g} - z_{k-1} \right)}{\Delta z^2} + W_{c_{i,j,k}}^n + W_{Lz_{i,j,k}}^n. \end{aligned} \quad (18)$$

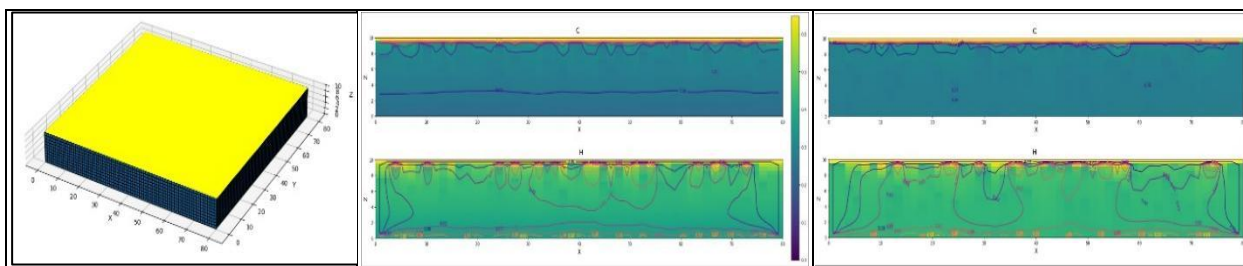
Чтобы найти давление  $P_{i,j,k}^{n+1}$  на новом шаге, перепишем уравнение (18):

$$\begin{aligned} P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t^n \rho g}{S_{save}} \left[ \frac{k_{i+\frac{1}{2},j,k}^n \left( \frac{P_{i+1,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta x^2} - \frac{k_{i-\frac{1}{2},j,k}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i-1,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta x^2} + \frac{k_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \left( \frac{P_{i,j+1,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta y^2} - \right. \\ \left. - \frac{k_{i,j-\frac{1}{2},k}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - \frac{P_{i,j-1,k}^n}{\rho g} \right)}{\Delta y^2} + \frac{k_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \left( \frac{P_{i,j,k+1}^n}{\rho g} + z_{k+1} - \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} - z_k \right)}{\Delta z^2} - \frac{k_{i,j,k-\frac{1}{2}}^n \left( \frac{P_{i,j,k}^n}{\rho g} + z_k - \frac{P_{i,j,k-1}^n}{\rho g} - z_{k-1} \right)}{\Delta z^2} + W_{c_{i,j,k}}^n + W_{Lz_{i,j,k}}^n \right] \end{aligned}$$

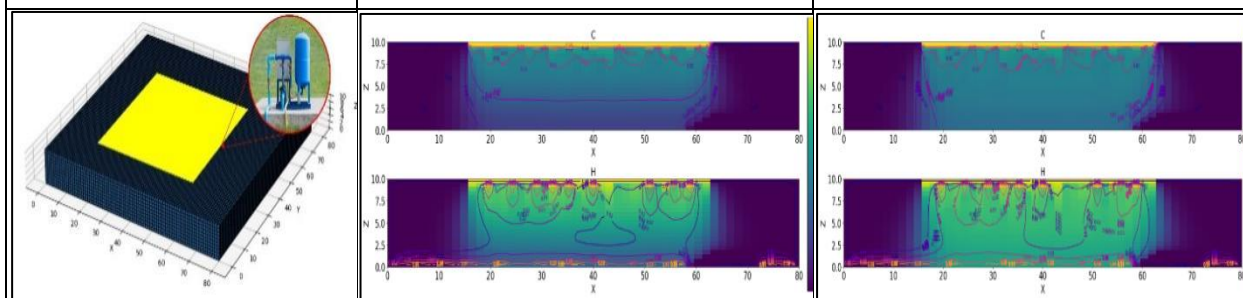
Используя метод итерации для поставленной задачи, сходимость проверяется следующим условием:

$$\max |C^{r+1} - C^r| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon = 0.001$$

Рисунки 3 и 4 демонстрируют результаты численных экспериментов, проведенных для усовершенствованной математической модели движения подземных вод на территориях посевов повторных культур, как описано в параграфе 3.3:



**Рис. 3. Полное орошение территории**



**Рис. 3. Подача частичной оросительной воды на территорию и водозабор через дренаж (насос)**

Четвертая глава диссертационной работы, озаглавленная **“Программный комплекс исследования изменения уровня грунтовых вод в районах посева повторных культур и анализ результатов”** посвящена разработке программного комплекса на основе эффективных вычислительных алгоритмов математических моделей, представленных во II и III главах, а также описанию результатов экспериментальных исследований. Программный комплекс предназначен для прогнозирования изменения уровня грунтовых вод и включает в себя ряд взаимодополняющих программных средств. С помощью программного комплекса были проведены вычислительные эксперименты и представлен анализ полученных результатов.

В параграфах 4.1 и 4.2 приведены алгоритмы и обеспечение для комплекса программ исследования изменения уровня грунтовых вод в районах посева повторных культур. В рамках данных исследований разработаны численные вычислительные алгоритмы, основанные на математических моделях, таких как **“Движение грунтовых вод в районах посева повторных культур”** и **“Прогнозирование уровня грунтовых вод в орошаемых районах”**.

Ниже приводится программное обеспечение, написанное для численных вычислительных алгоритмов математических моделей. На рисунке 5 представлен интерфейс программного обеспечения для исходной усовершенствованной модели, а на рисунке 6 - для разработанной модели.



экспоненциально. В результате за 72 часа уровень грунтовых вод достиг 4,5 м. Если посмотреть на результаты усовершенствованной модели, то результаты, полученные из программного комплекса, показывают, что исходный уровень 4,2 м начал изменяться в прямом экспонентальном положении и в течение 72 часов поднялся до уровня 4,4 м. Если проанализировать результаты второй созданной модели, то на уровне 4,2 м через 6,2 часа оросительная вода воздействовала на грунтовые воды, а затем начала оказывать экспонентальное воздействие, в результате чего уровень поднялся до 4,75 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы **“Математическое моделирование процессов геофильтрации в зонах посева повторных культур”** заключаются в следующем:

1. Проведен подробный обзор международной и национальной литературы о фильтрации и влагопроводности подземных вод. Проведен анализ схематизация зоны геофильтрации, особенности подземных водоудерживающих слоев и методы математического моделирования водного баланса с точки зрения сущности поставленной задачи и получены соответствующие выводы. Определены этапы метода водного равновесия при решении гидрогеолого-мелиоративных задач и представлены данные по фильтрационным характеристикам пористой среды.

2. Усовершенствована математическая модель для прогнозирования движения и уровня подземных вод. Усовершенствованная модель позволяет определить скорость движения подземных вод и концентрацию воды в пористой среде. Модель эффективна в управлении оросительными системами, экономии водных ресурсов и решении экологических проблем.

3. Для численного моделирования процессов фильтрации подземных вод на территориях, где возделываются повторные культуры, была построена численная модель на основе уравнений в частных производных и для решения использованы методы конечных разностей, прогонки и итерации. Модель представляет эффективные решения по подземной фильтрации, орошению, управлению запасами воды и уровнем воды.

4. Разработаны математическая модель и информационная модель на основе почвенных параметров для прогнозирования движения и уровня подземных вод. Данная модель обеспечивает автоматическое управление с помощью информационной системы, обновляя данные орошения, температуры, засоления и другие. Модель позволяет прогнозировать движение воды и уровень грунтовых вод с учетом физических свойств почвы, водотока и подземных условий.

5. На основе закона Дарси и уравнений конвекции-диффузии достигнуто точное прогнозирование стока и распределения воды, что служит для разработки эффективных рекомендаций по экономии водных ресурсов и решению экологических проблем.

6. Разработаны эффективные вычислительные алгоритмы для прогнозирования движения и уровня подземных вод в районах посева повторных культур и орошения. На основе этих алгоритмов создан программный комплекс и разработаны инструкции по его применению в практических задачах. Проведены численные эксперименты и проанализированы результаты. Программный комплекс разработан на основе принципа модульности, применен к конкретным объектам и подтверждена его эффективность.



**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.13.30.12.2021.T.142.01 AT RESEARCH INSTITUTE FOR  
DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL  
INTELLIGENCE**

---

**DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE  
RESEARCH INSTITUTE**

**MURODULLAEV BAKHTIYOR TULKIN UGLI**

**MATHEMATICAL MODELING OF GEOFILTRATION PROCESSES IN  
REPEATEDLY CULTIVATED AREAS**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

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

**Tashkent - 2025**

The theme of Doctor of Philosophy (PhD) on technical was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of the Republic of Uzbekistan under number B2024.1.PhD/T4421.

The dissertation has been prepared at the Research Institute for Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website [www.airi.uz](http://www.airi.uz) and website "Ziyonet" Information and educational portal ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific adviser:**

**Habibullaev Ibroxim**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Official opponents:**

**Rakhmonov Zafar Ravshanovich**

Doctor of Physical-Mathematical Sciences,  
Docent

**Daliev Sherzod Karshievich**

Doctor of Philosophy in Technical  
Sciences, PhD

**Leading organization:**


**Karshi State University**


The defense will take place "31" *January* 2025 at 15<sup>00</sup> the meeting of Scientific council No. DSc.13.30.12.2021.T.142.01 at Research Institute for Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence. (Address: 100125, Tashkent city, M. Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz)).


The dissertation can be reviewed at the Information Resource Center of the Research Institute for Development of Digital Technologies and Artificial Intelligence (is registered under No. 52). (Address: 100125, Tashkent city, M. Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: [info@airi.uz](mailto:info@airi.uz)).

Abstract of dissertation sent out on "19" *January* 2025 y.  
(mailing report No. 20 on "16" *December* 2024 y.)



  
**N. Ravshanov**  
Chairman of the scientific council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

  
**F.M. Nuraliev**  
Scientific secretary of the scientific council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

  
**E.Sh. Nazirova**  
Chairman of the academic seminar under the scientific  
council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

## Introduction (Abstract of Doctoral (PhD) Dissertation)

**The aim of the research** is to develop and improve mathematical models, numerical algorithms, and software for forecasting changes in groundwater levels, taking into account irrigation regimes on sown areas with repeated crops.

**The object of the research** is the processes of geofiltration and geomigration in the interrelation of the physical properties of groundwater.

**The scientific novelty of the research** is as follows:

a mathematical model of geofiltration processes has been improved, characterizing the change in groundwater levels as a result of irrigation and the factors influencing the balance elements of the aquifers.

as a result of the saturation of the aeration zone and the change in the irrigation regime of repeated crops, a mathematical model of the process of water distribution, contact with the groundwater level, and layer saturation has been developed;

numerical solutions and efficient algorithms for implementing a mathematical model of geofiltration and geomigration processes in hydrogeologically connected aquifers have been developed;

a computational algorithm has been developed that continuously updates the coefficients of the model at each step in the overall time integration, taking into account the physical properties of areas where repeated crops are sown.

**Implementation of the research results.** Based on mathematical models and efficient numerical calculation algorithms for joint and interdependent geofiltration processes of groundwater and surface water in areas with repeated crops:

an improved mathematical model of geofiltration processes describing changes in groundwater levels as a result of irrigation and the factors influencing the balance elements of the aquifers, as well as a mathematical model of the process of saturation of the aeration zone, have been implemented in the “Pumping Stations and Energy Department under the Amu-Kashkadarya ODIHR.” (Reference No. 05/13-4053 of the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan dated October 30, 2024). As a result, monitoring of the underground hydrosphere in conditions of complex hydrogeological and water scarcity increased the reclamation efficiency of water supply by 4-7%; on the basis of measures to maintain the level of groundwater in the norm, it was possible to increase the yield of agricultural crops by 2-5%;

numerical solutions and effective algorithms for implementing a mathematical model of geofiltration and geomigration processes in hydrogeologically connected aquifers, as well as an algorithm and software package for calculating the coefficients of the developed model at each step in the integration of total time, have been implemented in the “Kasbi Irrigation Department.” (Reference No. 05/13-4053 of the Ministry of Water Resources of the Republic of Uzbekistan dated October 30, 2024). As a result, the application made it possible to form a system for monitoring and making effective management decisions on the state of changes in water management conditions in the underground hydrosphere.

**The structure and scope of the dissertation.** The volume of the dissertation is 118 pages and consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices.

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

**I bo'lim (I часть; I part)**

1. Khabibullayev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Numerical modeling of groundwater filtration processes in irrigation areas // Journal of "Numerical and applied mathematics problems" -T., 2023. №3(49). P.21-32. (05.00.00, №23)
2. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Three-dimensional mathematical model of groundwater level changes in irrigated land// Journal of "Numerical and applied mathematics problems" -T., 2023. №5(52). B.44-55. (05.00.00, №23)
3. Ravshanov N., Murodullaev B.T., Boborakhimov B.I. Numerical modeling of groundwater filtration in irrigated areas// Journal of "Numerical and applied mathematics problems" -T., 2024. №3(57). – P. 47-56. (05.00.00, №23)
4. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Takroriy ekin ekiladigan hududlarda suv miqdorining geofiltratsiya jarayonlariga ta'siri// "Agro Ilm" -T., 2024.№3(100). B.58-60. (05.00.00, №3)
5. Boboraximov B.I., Murodullaev B.T., Jo'raboyeva O.S., Haqnazarova D.O. Sug'oriladigan ekin maydonlarda geofiltratsiya jarayonining fizik xususiyatlarini inobatga olib matematik va sonli modellashtirish // "Raqamli texnologiyalarning nazariy va amaliy masalalari" xalqaro jurnali. -Samarqand., 2024. № 7(3). – 21-28 bet. (05.00.00;). ОАК Раёсатининг 2023 йил 29 августдаги 342/5-сон қарори: <https://oak.uz/pages/4802>.
6. Yusupov R.A., Xaitov N.T., Murodullaev B.T., Anorboev E.A., Abduvaitov A.A. Application of Telecommunication and Geoinformation Support of Groundwater Monitoring in Irrigated Agricultures Zones// In 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). IEEE. DOI: 10.1109/ICISCT52966.2021. P. 01-05. (Rayosat qarori № 308/6 30.10.2021 y. bilan ОАК ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan jurnallarga tenglashtirilgan (Scopus).
7. Nazarov F.Kh., Madaliev M.E., Fayziyev R.A., Murodullaev B.T. Numerical Study of Laminar Flow Using Various Difference Schemes // ICFNDS '23: Proceedings of the 7th International Conference on Future Networks and Distributed Systems. P.377-383 (Scopus)
8. Murodullaev B.T., Haqnazarova D.O. Takroriy ekin ekiladigan hududlarning bir qatlamli g'ovak muhitida yer osti suvlarining maydonda harakatini axborot massivini ishlab chiqish // "O'zbekiston agrar fani xabarnomasi" Ilmiy-amaliy jurnal. -T., 2024. № 3(15) B.92-99 bet.(05.00.00 №7)
9. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Takroriy ekin ekiladigan hududlarda oqova suv miqdorining yer osti suv sathiga ta'siri // "O'zbekiston agrar fani xabarnomasi" Ilmiy-amaliy jurnal. -T., 2024. № 2(14)– 75-78 bet. (05.00.00 №7)

10. Murodullaev B.T., Tajikhodjaeva E.R., Haqnazarova D.O. Mathematical and numerical modeling taking into Account the physical characteristics of the Geofiltration process in irrigated cultivated areas//“Информационные технологии моделирования и управления” Научно-технический журнал. -М., 2024 №3(137)С–185-192. (05.00.00 №43)

### **II bo‘lim (II часть; II part)**

11. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Matematik modellashtirish orqali takroriy ekin ekiladigan hududlarda gidrogeologiya muammolarini tizimli tahlil qilish (Qashqadaryo viloyati misolida)// “Fizika, matematik va informatika” ilmiy-uslubiy jurnal. -T., 2022 №6. B.120-127

12. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Takroriy ekin ekiladigan hududlarda gidrogeologiya muammolarini hal qilishda tizimli yondashuv // “Fizika, matematik va informatika” ilmiy-uslubiy jurnal. -T., 2022 №6. B.128-155

13. Djumanov J., Egamberdiev Kh., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Numerical calculation of groundwater geofiltration processes in multilayer porous media//“Fizika, matematik va informatika” ilmiy-uslubiy jurnal.-T., 2023. №1 B.64-74

14. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Takroriy ekin ekiladigan hududlarda gidrogeologiya muammolarini hal qilishda tizimli yondashuv (Qashqadaryo viloyati misolida) // “FarDU ilmiy xabarlar”. -Farg’ona. 2022 №3. B.292-298

15. Khabibullaev I., Murodullaev B.T. Sug'orish suvidan foydalanishning yer osti suvlari muhitiga va tuproq sho‘rlanishiga ta’siri//“Results of National Scientific Research”. №1(1). P.226–238

16. Murodullaev B.T., Jamolov X.M., Haknazarova D.O. Suв resurslari taqsimoti monitoringi yuritilishida apparat dasturiy vositalar// “UZACADEMIA” ilmiy-uslubiy jurnali. 2021.Vol 2, Issue 1 (22), part - 2. ISSN (E) – 2181 – 1334.

17. Murodullaev B.T., Haknazarova D.O., Jamolov X.M. Yer osti suvlarining filtratsiya jarayonlarining nazariy/“O‘zbekistonda fanlar aro innovatsiyalar va ilmiy tadqiqotlar” jurnali. -T., 2021 №1(1). 444-454 bet.

18. Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Tekislik va nisbatan issiq hududlarda sug’orish jarayoning yer osti suvlariga ta’siri (Qashqadaryo viloyati Kasbi tumani misolida) // Raqamli texnologiyalar: sohalarda amaliy joriy etishning yechimlari va muammolari Xalqaro ilmiy-texnik anjumani. Ma’ruza to‘plami. -T., 2022. B.178-182

19. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvlarini filtratsiyasi jarayonlarini matematik modellashtirish // “Matematik modellashtirish va axborot texnologiyalarining dolzarb masalalari” xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. To‘plam-2. Nukus-2023. – 173-175 bet.

20. Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Mathematical modeling of changes in groundwater level in repeated cropping lands “Amaliy matematikaning

zamonaviy muammolari va istiqbollari” Respub. ilmiy-amaliy konf. Qarshi-2024. - 78-80 bet.

21. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Sug’oriladigan hududlarda sug’orish suvining yer osti suv sathiga ta’sirining tahlili va matematik modeli// “Matematik modellashtirish, algoritmlash va dasturlashning dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-texnik anjumani. -T., 2023. – 14-17 bet.

22. Djumanov J.X., Egamberdiyev X.S., Murodullaev B.T., Jamolov X.M. Yer osti suvlari holatini avtomatlashtirilgan o‘lchash va kuzatish qurilmalari // "Axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish sharoitida innovatsiyalar" mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani. Qarshi-2019. – 94-95 bet.

23. Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Yer osti suv sathining o‘zgarishiga filtratsiya koeffitsientining ta’sirini matematik modellashtirish// “Raqamli texnologiyalarning iqtisodiyot va ta’limdagi o‘rni” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. -Samarqand-2024. 2-qism. – 179-182 bet.

24. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Axrorov F., Haknazarova D.O. Obyektlarni klassifikatsiyalashning Statistik usuli// “Raqamli iqtisodiyot sharoitida sun’iy intellektni qo‘llashning nazariy asoslari” mavzusida respublika ilmiy -amaliy konferensi. -Toshkent-2023. – 520-522 bet.

25. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Axrorov F., Haknazarova D.O. Obyektlarni sinflashning dasturiy ta’minoti// “Raqamli iqtisodiyot sharoitida sun’iy intellektni qo‘llashning nazariy asoslari” mavzusida respublika ilmiy-amaliy konferensi. -Toshkent-2023. – 525-527 bet.

26. Murodullaev B.T., Axrorov F., Haknazarova D.O. ChatGPT Yordamida suv filtratsiyaning matematik modellariga dasturiy ta’minot ishlab chiqish // “Raqamli iqtisodiyot sharoitida sun’iy intellektni qo‘llashning nazariy asoslari” mavzusida respublika ilmiy-amaliy konferensi. Toshkent-2023. – 350-352 bet.

27. Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Suv filtratsiyaning matematik modellariga ChatGPT yordamida dasturiy ta’minot ishlab chiqish // Sun’iy intellekt va raqamli texnologiyalarning jamiyatdagi o‘rni mavzusida respublika ilmiy -amaliy anjumani. -Qarshi-2023. – 45-48 bet.

28. Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Tekislik va nisbatan issiq hududlarda sug’orish jarayoning yer osti suvlariga ta’siri (Qashqadaryo viloyati Kasbi tumani misolida) // “Ilm-fan va ta’limda innovatsion yondashuvlar, muammolar, taklif va yechimlar” mavzusidagi 23-sonli respublika ilmiy-onlayn konferensiyasi. -Toshkent-2022. 1-qism. – 149-152 bet.

29. Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Filtratsiya parametrlarini aniqlashning o‘lchamlar nazariyasi usuli // “Hozirgi sharoitda yuqori malakali kadrlarni tayyorlashda o‘qitishning zamonaviy tizimlari va texnologiyalarini qo‘llash masalalari” Respublika ilmiy-uslubiy konferensiyasi. -Toshkent-2021. – 199-202 bet.

30. Murodullaev B.T., Haknazarova D.O. Jamolov X.M. Zamonaviy ta’limda axborot texnologiyalarining o‘rni va tahlili // “Iqtisodiyot tarmoqlarining innovatsion rivojlanishida axborot-kommunikatsiya texnologiyalarining ahamiyati” Respublika ilmiy-texnik anjumani, 1-Qism. -Toshkent-2021. – 207-209 bet

31. Djumanov J.X., Ishanxodjayev O. A., Yusupov R. A., Egamberdiyev X.S., Murodullaev B.T. Tasvirlardan ma'lumotlar olish, qayta ishlash va tahlil qilish dasturi // O'zR Adliya vazirligi, O'zR Dasturiy mahsulotlar davlat reyisterida 11.11.2021-yilda ro'yxatdan o'tgan Guvohnoma № DGU 13666.

32. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haqnazarova D.O. KLASSIFIKATOR // O'zR Adliya vazirligi, O'zR Dasturiy mahsulotlar davlat reyisterida 07.08.2023-yilda ro'yxatdan o'tgan Guvohnoma № DGU 27750.

33. Khabibullaev I., Murodullaev B.T., Haqnazarova D.O. Takroriy ekin ekiladigan hududlarda yer osti suvlari harakati // O'zR Adliya vazirligi, O'zR Dasturiy mahsulotlar davlat reyisterida 13.11.2023-yilda ro'yxatdan o'tgan Guvohnoma № DGU 29596.

34. Murodullaev B.T., Haqnazarova D.O. Sug'oriladigan hududlarda yer osti suvlari sathini bashoratlash // O'zR Adliya vazirligi, O'zR Dasturiy mahsulotlar davlat reyisterida 25.06.2024-yilda ro'yxatdan o'tgan Guvohnoma № DGU 41007.

Avtoreferat “Hisoblash va amaliy matematika muammolari” ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o’kazildi va o’zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi.