

**ЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ**  
**ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**  
**DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

---

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ДАЛИЕВ ШЕРЗОД КАРШИЕВИЧ**

**ЕР ОСТИ СУВЛАРИНИНГ САТҲИ ВА МИНЕРАЛЛАШУВИ**  
**ЎЗГАРИШИНИ БАШОРАТ ҚИЛИШ УЧУН ГЕОФИЛЬТРАЦИЯ**  
**ЖАРАЁНЛАРИНИ СОНЛИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

**ТЕХНИКА ФАНЛАР БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)**  
**ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Самарқанд – 2021

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ**  
**ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**  
**DSc.13/30.12.2019.T.07.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**САМАРҚАНД ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ДАЛИЕВ ШЕРЗОД ҚАРШИЕВИЧ**

**ЕР ОСТИ СУВЛАРИНИНГ САТҲИ ВА МИНЕРАЛЛАШУВИ**  
**ЎЗГАРИШИНИ БАШОРАТ ҚИЛИШ УЧУН ГЕОФИЛЬТРАЦИЯ**  
**ЖАРАЁНЛАРИНИ СОНЛИ МОДЕЛЛАШТИРИШ**

05.01.07 – Математик моделлаштириш. Сонли усуллар ва дастурлар мажмуи

**ТЕХНИКА ФАНЛАР БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)**  
**ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Самарқанд – 2021**

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2020.2.PhD/T1572 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Самарқанд Давлат университетига бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.tuit.uz](http://www.tuit.uz)) ва «Ziynet» Ахборот таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

<b>Илмий раҳбар:</b>	<b>Равшанов Нормажмад</b> техника фанлари доктори, профессор
<b>Расмий оппонентлар:</b>	<b>Назирова Элмира Шодмоновна</b> техника фанлари доктори, доцент <b>Болтибаев Шухратжон Комилжанович</b> техника фанлари бўйича фалсафа доктори
<b>Етакчи ташкилот:</b>	<b>Механика ва вившоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти</b>

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги DSc.13/30.12.2019.T.07.01 Илмий кенгашининг 2021 йил «06» сентябрь соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100200, Тошкент шаҳри, Амир Темура кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-64-43, факс: (99871) 238-65-52, e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

Диссертация билан Тошкент ахборот технологиялари университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (\_\_\_\_\_ рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100200, Тошкент шаҳри, Амир Темура кўчаси, 108-уй. Тел.: (99871) 238-65-44).

Диссертация автореферати 2021 йил «  » \_\_\_\_\_ куни тарқатилди.  
(2021 йил «12» сентябрь даги 10 рақамли реестр баённомаси).

**Р.Х.Хамдамов**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
раиси, техника фанлари доктори, профессор

**Ф.М.Нуралiev**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
илмий котиби, техника фанлари доктори, доцент

**Ш.А.Садуллаева**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар  
раиси, физика-математика фанлари доктори, доцент

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда ер ости сувлари сатхи ўзгариши ва минераллашуви даражасига доир тадқиқотларга катта эътибор берилмоқда. Аҳолининг ичимлик сувига ва қишлоқ хўжалиги секторининг суғориш учун керак бўлган сувга талабларининг ортиб бориши туфайли бу муаммо долзарб ҳисобланади. Шуни таъкидлаш лозимки, Ўрта Осиё, Кавказ ва бошқа ҳудудлар қишлоқ хўжалиги ерларининг кўпгина қисмини суғориш ер ости сувлари ҳисобидан амалга оширилади. Шу боисдан, ер ости сувлари сатхи ўзгариши ва минераллашуви жараёнларининг математик моделларини ҳамда бу масалаларни ечиш учун самарали ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш ҳамда такомиллаштириш энг долзарб илмий муаммолардан ҳисобланади. Бу йўналишда ривожланган хорижий мамлакатларда, жумладан, Япония, Дания, Канада, Россия, Хитой, Германия, Ҳиндистонда мураккаб гидродинамик ва геофилтрацион жараёнларини тадқиқ қилиш учун математик моделлар ва сонли ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқишга катта эътибор қаратилмоқда.

Ҳозирги вақтда жаҳонда ер ости сувлари ҳаракати ва геофилтрация жараёнларини ўрганишга йўналтирилган мақсадли тадқиқотлар кенг олиб борилмоқда. Бу йўналишнинг асосий масалалари сирасига, жумладан, ер ости сизот ва босимли сувлари сатхи ўзгариши жараёнларининг сонли моделларини ҳамда ҳисоблаш алгоритмларини такомиллаштириш ҳам кириди. Шунингдек, бир ва икки қатламли муҳитларда ер ости сувлари сатхи ўзгариши ва минераллашуви жараёнларининг такомиллаштирилган математик моделларини, самарали сонли ҳисоблаш алгоритмларини ва дастурий воситаларини ишлаб чиқиш долзарб мақсадли илмий тадқиқотлардан биридир.

Республикаимиз хўжалик фаолиятида муҳим аҳамиятга эга бўлган ер ости сув ресурслари ҳолатини баҳолаш, мониторинг ва башорат қилиш билан боғлиқ мураккаб гидродинамик жараёнларининг математик моделларини такомиллаштириш ва амалиётга жорий этиш чора-тадбирларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Жумладан, Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамасининг 2017 йил 18 майдаги «Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академиясининг янгидан ташкил этилган илмий-тадқиқот муассасалари фаолиятини ташкил этиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги 292-сонли қарорида «...математик физика, амалий математика ва математик моделлаштириш» каби математика фанларининг халқаро стандартлар даражасидаги устувор йўналишларида илмий тадқиқотлар олиб бориш назарда тутилган. Қарор ижросини таъминлашда, жумладан, ер ости сувлари сатхи ўзгаришини башорат қилиш, оқова сувларини тозалаш, геофилтрация жараёнларининг математик моделларини такомиллаштириш, ҳисоблаш тажрибаларини ўтказишнинг самарали алгоритм ва дастурий воситаларини яратиш ҳам муҳим аҳамиятга эга.

Ушбу диссертация иши маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон

Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 4 майдаги ПҚ-2954-сон «2017-2021 йилларда ер ости сувлари захираларидан оқилона фойдаланишни назорат қилиш ва ҳисобга олишни тартибга солиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2018 йил 27 апрелдаги ПҚ-3682-сон «Инновацион ғоялар, технологиялар ва лойиҳаларни амалий жорий қилиш тизимини янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2020 йил 7 майдаги ПҚ-4708-сон «Математика соҳасидаги таълим сифатини ошириш ва илмий-тадқиқотларни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги ва 2020 йил 6 октябрдаги ПҚ-4851-сон «Ахборот технологиялари соҳасида таълим тизимини янада такомиллаштириш, илмий тадқиқотларни ривожлантириш ва уларни ИТ-индустрия билан интеграция қилиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни бажаришга хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларга мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг IV. «Ахборотлаштириш ва ахборот-коммуникация технологияларини ривожлантириш» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ер ости сувлари ҳаракатларини ўрганиш учун геофилтрация жараёнларини математик моделлаштириш бўйича илмий адабиётлар таҳлили ушбу йўналишда бир қатор аҳамиятли назарий ва амалий натижалар олинганлигини кўрсатди.

А.Дарси, Ф.Форхгеймер, Ж.Дюпюи, Ж.Буссинеск, Н.Е.Жуковский ва бошқа хорижий олимларнинг илмий ишлари ер ости гидродинамикаси жараёнларини математик моделлаштиришнинг фундаментал аспектларига бағишланган. П.Я.Полубаринова-Кочина, В.И.Аравина, С.Н.Нумеров, Г.Н.Каменск, А.И.Силина-Бекчурин, П.П.Климентов, Г.Б.Пыхачев, В.А.Мироненко, И.К.Гавич, В.Н.Шелкачев, М.А.Гусейн-заде, В.М.Шестаков, Н.Н.Веригин, И.А.Чарний, Ф.М.Бочеве, М.С.Хантуш, С.Е.Жакоб, К.Э.Лембеке, М.Льюис, Р.Ј.Мonteiro, Ch.Н.Рycroft, G.І.Вarenblatt, T. W. Patzek, D. B. Silin, M. Chraibi, S. Zaleski, F. Franco, C. Atkinson, R. A. Isangulov, M. N. Hamdan ва бошқа тадқиқотчилар ер ости сувлари сатҳининг ўзгариши ва минераллашуви жараёнларининг математик моделларини яратишда катта ҳисса қўшдилар.

Ўзбекистонда геофилтрация, гидродинамика жараёнларининг математик моделлари ва самарали сонли усулларини ишлаб чиқишда Ф.Б.Абуталиев, Э.Б.Абуталиев, Р.Садуллаев, Ж.Ф.Файзуллаев, Н.Муҳидинов, И.Алимов, Б.Хўжаёров, Р.Н.Усмонов, Н.Равшанов, В.Ф.Бурнашев, Э.Ш.Назирова, Ж.Джуманов, А.Неъматов ва бошқа олимлар салмоқли илмий натижаларга эришишган.

Сохага оид тадқиқотлар таҳлили шуни кўрсатадики, ер ости сизот ва босимли сувлари сатҳи ҳамда минераллашуви даражасининг ўзгариши жараёнлари, ернинг мелиоратив ҳолатини ва ер ости сувлари захиралари

Ўзгаришини баҳолаш билан боғлиқ масалаларни янада чуқурроқ ва ҳар томонлама тадқиқ этиш усулларини ишлаб чиқишни талаб этади.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган муассасаларининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Самарқанд Давлат университети илмий-тадқиқот ишлари режасининг «Амалий масалаларни математик моделлаштириш» (2015-2020) мавзусидаги ва Тошкент ахборот технологиялари университети ҳузуридаги Ахборот коммуникация технологиялари илмий-инновацион марказининг илмий тадқиқот ишлари режасининг №БВ-М-Ф4-001 – «Мураккаб иссиқлик ва модда алмашинувига доир кўп ўлчовли масалаларнинг математик моделлари ва тақсимланган самарали ҳисоблаш алгоритмлари» (2017-2020) ва №БВ-Атех-2018-9 – «Атмосфера ва сув ресурсларини техноген омилларида химоя қилиш масалаларини ечиш учун моделлар, тақсимланган ҳисоблаш алгоритмлари ва дастурий воситалар яратиш» (2018-2020) мавзуларидаги тадқиқот ишлари доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** ер ости сизот ва босимли сувлари сатҳи ҳамда минераллашуви ўзгаришини башорат қилиш учун математик моделлар, сонли алгоритмлари ва дастурий мажмуани ишлаб чиқиш ҳамда такомиллаштиришдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

ер ости сизот ва босимли сувлари геофилтрация жараёнларининг ахборот моделини ишлаб чиқиш;

тупроқ ғоваклиги, қудуқлар қуввати (дебит) ҳамда ташқи омиллар ва буғланишни тавсифловчи функционал боғланишларни ҳисобга олган ҳолда ер ости сувлари сатҳи ўзгариши жараёнларининг математик моделини ишлаб чиқиш;

ер ости сувлари сатҳининг ўзгаришини ҳамда сизиб кириш ва чиқиш жараёнларини тавсифловчи умумий чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда бир ва икки қатламли муҳитларда туз қўчиши ва диффузияси жараёнларининг математик моделини ишлаб чиқиш;

вақт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан юқори тартибли аниқликка эга бўлган мутлақ турғун ошқормас схемага асосан бир ва икки қатламли муҳитларда ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгариши масалаларини ечиш учун самарали сонли ҳисоблаш алгоритмларини ишлаб чиқиш;

бир ва икки қатламли муҳитларда ер ости сувлари сатҳи ва минераллашув даражаси ўзгаришини башорат қилиш учун дастурий мажмуани ишлаб чиқиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида бир ва икки қатламли муҳитларда ер ости сувлари динамикаси ҳамда геофилтрация жараёнлари олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** математик моделлар, ҳисоблаш алгоритмлари ва ЭХМда ҳисоб ишларини олиб бориш учун дастурий мажмуалар ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Диссертация ишини бажариш жараёнида ҳисоблаш математикаси, математик моделлаштириш ва ҳисоб тажрибаси усуллари, шунингдек дастурий маҳсулот ишлаб чиқиш учун объектга йўналтирилган дастурлаш технологияларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

ташки омиллар ва бугланишни тавсифловчи функционал боғланишлар ҳамда ғовакликни ҳисобга олган ҳолда ер ости сизот ва босимли сувлари сатҳи ўзгариши жараёнининг математик модели ишлаб чиқилган;

кудукларнинг куввати (дебитни) ва чизикли бўлмаган учинчи тур чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда ер ости сизот ва босимли сувлари сатҳи ўзгариши жараёнининг математик модели такомиллаштирилган;

ер ости сувлари сатҳининг ўзгаришини ҳамда сизиб кириш ва чиқиш жараёнларини тавсифловчи умумий чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда бир ва икки қатламли мухитларда туз кўчиши ва диффузияси жараёнларининг математик модели ишлаб чиқилган;

вакт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан юқори тартибли аниқликка эга бўлган мутлақ турғун ошқормас схема асосида бир ва икки қатламли мухитларда ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгаришини башоратлаш масалаларини ечиш учун самарали сонли алгоритмлар ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

ташки манбалар ва бугланиш, тупроқ ғоваклиги ва учунчи тур чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда бир ва икки қатламли мухитда ер ости сувлари сатҳи ва минераллашуви даражаси ўзгаришларини таҳлил, мониторинг ва башорат қилиш учун дастурий мажмуа ишлаб чиқилди;

ишлаб чиқилган дастурий мажмуа ер ости сувлари сатҳи ва минерализация даражаси ўзгаришини башорат қилиш ва улар асосида мелиорация тадбирларини ўтказишга доир амалий тавсиялар ишлаб чиқиш имконини берди.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги фойдаланилган тенгламалар ва шартларнинг масса сақланиш ва А.Дарси қонунига қатъий мослиги билан изоҳланади. Сонли усуллардан фойдаланилганида зарурий аниқлик, ҳисоблаш жараёнининг турғунлиги ва яқинлашувчанлиги, ҳисоб натижалари ўрганилаётган жараёнларнинг табиатига зид эмаслиги таъминланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ички ва ташқи омилларнинг ер ости сувлари сатҳи ва улардаги туз концентрацияси ўзгаришига таъсирини ҳисобга олган ҳолда бир ва икки қатламли мухитларда ер ости сувларининг ҳаракати математик моделларининг такомиллаштирилганлиги, вакт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан юқори тартибли аниқликка эга бўлган мутлақ турғун ошқормас схемага асосланган самарали сонли алгоритмларнинг ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти** геофилтрация жараёнларини мониторинг ва башорат қилиш учун дастурий мажмуа ишлаб

чикишда ифодаланадик, у ҳисоблаш вақтини камайтирди ва ер ости сувлари сатҳини ва уларнинг минераллашув даражасини аниқлаш учун муҳандислик ҳисоб-китобларининг аниқлигини оширди.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Ер ости сувлари геофилтрация жараёнларининг такомиллаштирилган математик моделлари ва самарали сонли ҳисоблаш алгоритмлари асосида:

оқова сувлари ҳаракати ҳамда ер ости сувлари сатҳининг ва тупроқда тузлар концентрациясининг вақт давомида ўзгаришини мониторинг қилиш ва башоратлаш учун ишлаб чиқилган математик ва дастурий таъминотлар Самарқанд вилоят уй-жой коммунал хизмат кўрсатиш бошқармаси Давлат «Сувоқова» унитар корхонаси объектларида жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси уй-жой коммунал хизмат кўрсатиш вазирлигининг 2020 йил 28 февралдаги №01/02-1008-сон маълумотномаси). Тадқиқот натижалари умумлаштирилган моделлардан фойдаланган ҳолда сувнинг минераллашуви ва оқова сувларнинг тупроқ қатламларига сингиб кетиши жараёнини ҳамда сув етказиб берилаётган ҳудудлардаги сувлар сатҳининг ўзгаришини башоратлаш ҳамда муҳандислик ҳисобларини ўтказишга кетадиган вақт ва меҳнат сарфини 5-6 % га қисқартириш имконини берган;

ер ости сувлар сатҳи ва тупроқнинг минераллашуви даражаси ўзгаришини таҳлил қилиш ва башоратлаш учун ишлаб чиқилган математик ва дастурий таъминотлар Сирдарё-Зарафшон ирригация тизимлари ҳавза бошқармаси объектларида жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларни ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 15 январдаги 33-8/317-сон маълумотномаси). Натижада ер ости сув сатҳи ва ерларнинг туз концентрацияси ўзгаришини башорат қилиш имкони яратилган ҳамда муҳандислик ҳисобларини ўтказишга кетадиган вақт ва меҳнат сарфи 3-4 %га қисқартирилган;

математик ва дастурий таъминотлар Жиззах вилоят сув омборларидан фойдаланиш бошқармаси тассарруфидаги ҳудудларда сизот сувлар сатҳининг ўзгаришини баҳолаш учун жорий этилган (Ахборот технологиялари ва коммуникацияларни ривожлантириш вазирлигининг 2021 йил 15 январдаги 33-8/317-сон маълумотномаси). Натижада суғориш масалаларида қатламларнинг ёрик-говак муҳитдан иборат эканлигини ҳисобга олиб, геофилтрация жараёнида ер ости сувлари сатҳи ўзгариши баҳоланган ҳамда муҳандислик ҳисобларини ўтказишга кетадиган вақт ва меҳнат сарфини 0.2 марта қисқартириш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Ушбу тадқиқот натижалари 7 та халқаро ва 5 та республика илмий-амалий конференцияларда муҳокама қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича 24 та илмий иш чоп этилган. Шундан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларида 10 та илмий мақола, жумладан 6 таси хорижий ва 4 таси республика нашрларида чоп этилган ҳамда 2 та ЭҶМ учун яратилган дастурий воситаларига қайд қилиш гувоҳномалари олинган.



Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация 120 бетдан иборат бўлиб, кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан ташкил топган.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган. Тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари белгилаб олинган ҳамда тадқиқот объекти ва предмети тавсифланган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асослаб берилган, уларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “Ер ости сувлари ҳаракати ва минераллашуви жараёнларининг математик моделлари таҳлили” деб номланган биринчи бобида жаҳонда ва республикамиз миқёсида ер ости сувлари ҳаракати ва минераллашуви жараёнларини математик моделлаштириш, ечиш усулларига бағишланган илмий адабиётлар, мақолалар атрофлича таҳлил қилинган. Математик моделлаштириш ва ҳисоблаш тажрибалари босқичлари схемаси, ер ости сувлари ҳаракати ва минераллашуви жараёнларини ифодаловчи моделларни аналитик ва тақрибий ечишга доир мисоллар келтирилган. Ушбу илмий манбалар ва ҳисоблаш методлари таҳлили тадқиқот ишининг мақсади ва вазифаларини шакллантириш имконини берган.

Диссертациянинг иккинчи «Ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгаришини башорат қилиш масалаларини математик моделлаштириш» боби ер ости сувлари сатҳининг ўзгаришини башорат қилиш ҳамда сизот ва босимли сувли қатламлардаги тузлар концентрацияси ўзгариши жараёни учун математик моделларни ишлаб чиқиш ва тадқиқ қилишга бағишланган.

Бобнинг биринчи параграфида ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгаришига таъсир этувчи омилларнинг мавсумийлиги ўрганилиб, жумладан, қуйидаги боғланишлар шакллантирилган.

Ташқи омилларни ҳисоблаш учун қуйидагича боғланиш олинган:

$$f = f_0 + \Delta f \sin \omega t,$$

бу ерда  $f_0$  – ташқи омилларнинг ойлик ўртача ўзгариши;  $\Delta f$  – ташқи омилларнинг йиллик ўзгариш амплитудаси;  $\omega$  – ойлик ўзгаришларнинг циклик частотаси.

Буғланишни ҳисоблаш учун қуйидагича боғланиш олинган:

$$\omega = \omega_0 + \Delta \omega \sin \omega t,$$

бу ерда  $\omega_0$  – буғланишнинг ойлик ўртача ўзгариши;  $\Delta \omega$  – буғланишнинг йиллик ўзгариш амплитудаси.

Иккинчи параграфда ташқи омиллар ва буғланишнинг таъсирини ҳисобга олган ҳолда ер ости сизот сувлари сатҳи ва туз концентрациясининг ўзгаришининг диффузион ва конвектив кўчиш жараёнларини биргаликда

ҳисобга олган ҳолда гидродинамиканинг асосий қонунлари асосида математик модели ишлаб чиқилган. Бу модель учун сизиб кириш ва чиқишни тавсифловчи чизикли бўлмаган чегаравий шартлар шакллантирилган. Жараёнинг математик модели чизикли бўлмаган дифференциал тенгламалар системаси кўринишида қуйидагича ифодаланди:

$$\left. \begin{aligned} \mu \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + f - \omega, \\ \mu h \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( Dh \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Dh \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - v_x h \frac{\partial \theta}{\partial x} - v_y h \frac{\partial \theta}{\partial y} + f \theta_f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ва унинг бошланғич ва чегаравий шартлари қуйидагича бўлди:

$$t = t_0 \text{ да: } h(x, y, t_0) = h_0, \theta(x, y, t_0) = \theta_0, \quad (2)$$

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

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

$$\mu h \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta - \theta_0), \quad \mu h \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L} = (\theta - \theta_0); \quad (4)$$

$$\mu h \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = -(\theta - \theta_0), \quad \mu h \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L} = (\theta - \theta_0). \quad (4^*)$$

Бу ерда  $h(x, y, t)$  – сизот сув сатҳи;  $\mu$  – сув йўқотилиши коэффициентлари;  $k$  – фильтрация коэффициентлари;  $f$  – ташқи омиллар;  $\omega$  – буғланиш;  $\theta(x, y, t)$  – туз концентрацияси;  $v_x, v_y$  – фильтрация тезликлари;  $D$  – диффузия коэффициентлари;  $\theta_f$  – туз концентрацияси (инфильтрация сувларидан келатган);  $h_0(x, y, t_0)$  – сизот сув сатҳининг бошланғич қиймати;  $\lambda$  – чегаравий шартни ўлчовли шаклга келтириш коэффициентлари;  $\theta_0(x, y, t_0)$  – сизот сувли қатламда туз концентрациясининг бошланғич қиймати.

Учинчи параграфда икки қатламли муҳитларда ташқи омиллар, буғланиш, грунтда ғовақлик, сув йўқотилиши коэффициентлари, юкори ва пастки қатламларнинг фильтрация коэффициентлари, босимли суви қатламида дебит каби муҳим ўрин тутувчи параметрларни инobatга олган ҳолда ер ости сувлари сатҳи ҳамда улардаги туз концентрацияси ўзгариши жараёнининг математик модели келтирилган. Жараёнинг математик модели чизикли бўлмаган дифференциал тенгламалар системаси

$$\left. \begin{aligned} \mu n_0 \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_0 h \frac{\partial h}{\partial x} \right) - k_1 \frac{h - H}{m} + f - \omega, \\ \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + k_2 \frac{h - H}{m} - \eta Q, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ҳамда сизиб кириш ва чиқиш жараёнини эътиборга олган ҳолда мос бошланғич ва икки томонлама очик чегаравий шартлар орқали ифодаланган:

$$h_{x=0} = h_0, \quad H_{x=0} = H_0, \quad (6)$$

$$n_0 h \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(h - h_0), \quad n_0 h \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=L} = (h - h_0), \quad \mu \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(H - H_0), \quad \mu \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=L} = (H - H_0), \quad (7)$$

бу ерда  $h(x, t)$  ва  $H(x, t)$  – ер ости сизот ва босимли сувлари сатҳлари;  $\mu$ ,  $\mu^*$  – сув йўқотилиш коэффициентлари;  $m$  – қатлам қуввати;  $k_1, k_2$  – юқори ва пастки қатламларнинг филтрация коэффициентлари;  $T$  – асосий горизонтнинг филтрация ўтказувчанлиги;  $Q$  – дебит;  $n_0$  – сизот сувли қатламда тупроқнинг ғоваклиги;  $\eta$  – моделни ўлчовли кўринишга ўтказиш коэффициентини;  $h_0, H_0$  – сизот ва босимли сув сатҳларининг бошланғич қийматлари.

Сизот ва босимли сувлар сатҳи ўзгариши таъсирида икки қатламли муҳитларда туз концентрацияси ўзгариши жараёни қуйидагича ифодаланган:

$$\left. \begin{aligned} \mu h \frac{\partial \theta_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right) - v_x h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + f_1 \theta_{1f}, \\ \mu^* H \frac{\partial \theta_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right) - v_x H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} + f_2 \theta_{2f}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(8) система қуйида келтирилган бошланғич ва чегаравий шартларда ечилган:

$$\theta_1(x, t) \Big|_{t=0} = (\theta_1)_0, \quad \theta_2(x, t) \Big|_{t=0} = (\theta_2)_0, \quad (9)$$

$$\mu h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad \mu h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=L} = (\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad (10)$$

$$\mu^* H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad \mu^* H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = (\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad (11)$$

$$\theta_1(x, t) \Big|_{x=m_x-0} = \theta_2(x, t) \Big|_{x=m_x+0}, \quad D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=m_x-0} = D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=m_x+0}. \quad (12)$$

Бу ерда  $\theta_1(x, t)$ ,  $\theta_2(x, t)$  – ер ости сизот ва босимли сувли қатламларда туз концентрацияси;  $v_x$  – филтрация тезлиги компонентаси;  $D_1, D_2$  – диффузия коэффициентлари;  $\theta_{1f}, \theta_{2f}$  – туз концентрациялари (инфилтрация сувидаги),  $(\theta_1)_0, (\theta_2)_0$  – сизот ва босимли сув қатламларидаги туз концентрациясининг бошланғич қийматлари;  $m_x$  –  $Ox$  йўналиш бўйича танланган ажратувчи чегара чизик.

Туртинчи параграфда гидрогеологик, геофилтрацион жараёнларни таҳлил қилиш натижаларига кўра, ер ости сизот ва босимли сувлари билан ажратилган соҳа икки қатламли муҳит сифатида кўриб чиқилган.

Грунт ғоваклиги, кудук қуввати, ташқи омилларни тавсифловчи функционал боғланишлар, шунингдек соҳа чегаралари орқали сизиб кириш ва чиқишни ҳисобга олганда ер ости сизот ва босимли сувлар сатҳларининг

Ўзгариши жараёни учун математик модель куйидаги чизикли бўлмаган дифференциал тенгламаларни ўз ичига олди:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 n_0 \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_1 m \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_1 m \frac{\partial h}{\partial z} \right) + k_1 \frac{H-h}{m} + f - \omega, \\ \mu_2 \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_2 m \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_2 m \frac{\partial H}{\partial z} \right) + k_2 \frac{h-H}{m} - \eta Q. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(13) система куйидаги бошланғич ва чегаравий шартларда ечилади:

$$h|_{t=0} = h_0, \quad H|_{t=0} = H_0, \quad (14)$$

$$\mu_1 m \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(h-h_0), \quad \mu_1 m \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = (h-h_0), \quad (15)$$

$$\mu_1 m \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(h-h_0), \quad \mu_1 m \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = (h-h_0), \quad (16)$$

$$\mu_2 m \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(H-H_0), \quad \mu_2 m \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = (H-H_0), \quad (17)$$

$$\mu_2 m \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(H-H_0), \quad \mu_2 m \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = (H-H_0), \quad (18)$$

бу ерда  $\mu_1, \mu_2$  – сув йўқотилиш коэффициентлари;  $m$  – қатлам қуввати.

Туз концентрацияси ўзгаришининг математик модели куйидагича ифодаланган:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \right) - v_x h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} - v_z h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} + f \theta_f, \\ \mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \right) - v_x H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} - v_z H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} + f_1 \theta_{1f}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

(19) система куйидаги бошланғич ва чегаравий шартларда ечилган:

$$(\theta_1)|_{t=0} = (\theta_1)_0, \quad (\theta_2)|_{t=0} = (\theta_2)_0, \quad (20)$$

$$\mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad \mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = (\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad (21)$$

$$\mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad \mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = (\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad (22)$$

$$\mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad \mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = (\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad (23)$$

$$\mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad \mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = (\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad (24)$$

$$\theta_1 \Big|_{z=m-0} = \theta_2 \Big|_{z=m+0}, \quad D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \Big|_{z=m-0} = D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=m+0}. \quad (25)$$

бу ерда  $v_x, v_y$  – фильтрация тезлиги компонентлари.

(1)–(25) масалаларни ечиш ўлчовсиз катталикларни киритган ҳолда амалга оширилган. Ушбу бобда қаралаётган масалаларни комплекс ўрганишни амалга ошириш учун ер ости бир ва икки қатламли мухитларда ер ости сувлари сатҳи ўзгаришининг математик модели ишлаб чиқилди ҳамда такомиллаштирилди. Туз концентрацияси ўзгаришини тавсифловчи математик моделни ишлаб чиқишда ва такомиллаштиришда ер ости сизот ва босимли сувлари сатҳларининг ўзгариши, ғоваклик, диффузия коэффициентлари, сув йўқотилиши коэффициенти, сув сатҳига боғлиқ филтрация тезликлари ҳамда сизиб кириш ва чиқиш жараёнини эътиборга олган ҳолда мос бошланғич ва икки томонлама очиқ чегаравий шартлар инobatга олиниб, экологик ҳолатга катта таъсир ўтказиш мумкинлиги тадқиқ қилинган.

Диссертациянинг «Ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгаришини башорат қилиш масалаларини сонли тадқиқ этиш» деб номланган учинчи боби иккинчи бобда келтирилган математик моделларни сонли ечиш учун ишлаб чиқилган самарали сонли алгоритмларга бағишланган. (1)–(25) масалалар чизикли бўлмаган дифференциал тенгламалар системалари билан ифодаланганлиги сабабли уларни аналитик усулда ечиш мураккаб бўлади. Шу боис кўрилатган масалаларнинг ечимларини топиш учун сонли усуллардан фойдаланамиз.

(1)–(4\*) масалаларни сонли ечиш учун чекли айирмалар усулини қўллаيمиз. Бунинг учун  $D = \{0 \leq x < L_x, 0 \leq y < L_y, 0 \leq t \leq N\}$  соҳага тўр киритамиз:

$$\omega_{\Delta x, \Delta y, \Delta t} = \{x = i \Delta x; i = \overline{0..I}; y = j \Delta y; j = \overline{0..J}; t_n = n\tau; n = \overline{0..N}\}$$

Ушбу ва кейинги масалаларни дискрет кўринишга келтириш жараёнида конвектив ҳадлар оқимга қарши схема ёрдамида аппроксимацияланишди, чизикли бўлмаган ҳадлар квазичизиклаштириш усулида соддалаштирилди ва қаралаётган вақт қатлами учун итерация жараёни ташкил этилди.  $n+1$  – вақт қатламида ҳар бир итерация қадами учун  $n + \frac{1}{2}$  – қатламда  $Ox$  ўқи бўйлаб,  $n+1$  – қатламда  $Oy$  ўқи бўйлаб ҳайдаш усули қўлланилди.

$n + \frac{1}{2}$  қатламда (1) система ҳамда (2) – (4\*) бошланғич ва чегаравий шартлар  $\omega_{\Delta x, \Delta y, \Delta t}$  тўрда ошқормас схемани қўллаб аппроксимация қилинди. Олинган чекли-айирмали схема  $h$  сатҳ функциясига нисбатан чизикли бўлмаганлиги сабабли, уни ечишда квазичизикли ҳолга келтирилди ҳамда итерация усули қўлланилди ва қуйидаги уч диагоналли алгебраик тенгламалар системалари кўринишига келтирилди:

$$a_{i,j} h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j} h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -d_{i,j}^n \quad (26)$$

$$a_{i,j}^1 \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j}^1 \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j}^1 \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -\bar{d}_{i,j}^n \quad (27)$$

бу ерда  $\bar{h}_{i,j}, \bar{h}_{i,j}, \bar{h}_{i+1,j}$  – сатх функцияларининг бошланғич итерация қийматлари,

$$\begin{aligned}
 a_{i,j} &= k_{i-0.5,j} 2\bar{h}_{i-1,j}, b_{i,j} = \frac{2\Delta x^2}{0.5\tau} + (k_{i-0.5,j} + k_{i+0.5,j}) 2\bar{h}_{i,j}, c_{i,j} = k_{i+0.5,j} 2\bar{h}_{i+1,j}, \\
 d_{i,j} &= \frac{2\Delta x^2 h_{i,j}^n}{0.5\tau} + (k_{i-0.5,j} + k_{i+0.5,j}) \bar{h}_{i,j}^2 - k_{i+0.5,j} \bar{h}_{i+1,j}^2 + \\
 &\quad + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \left( k_{i,j-0.5} (2\bar{h}_{i,j-1} h_{i,j-1}^n - \bar{h}_{i,j-1}^2) - \right. \\
 &\quad \left. - (k_{i,j-0.5} + k_{i,j+0.5}) (2\bar{h}_{i,j} h_{i,j}^n - \bar{h}_{i,j}^2) \right) + \\
 &\quad + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \left( k_{i,j+0.5} (2\bar{h}_{i,j+1} h_{i,j+1}^n - \bar{h}_{i,j+1}^2) \right) + 2\Delta x^2 \xi (f_{i,j} - \omega_{i,j}), \\
 a_{i,j}^1 &= \frac{\xi_1}{\Delta x^2} D_{i-0.5,j} + \frac{\xi_2 h_{i,j}^{n+1}}{2\Delta x} (|v_x| + v_x), b_{i,j}^1 = \frac{h_{i,j}^{n+1}}{0.5\tau} + \frac{\xi_1}{\Delta x^2} (D_{i-0.5,j} + D_{i+0.5,j}) + \frac{\xi_2 h_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} v_x, \\
 c_{i,j}^1 &= \frac{\xi_1}{\Delta x^2} D_{i+0.5,j} - \frac{\xi_2 h_{i,j}^{n+1}}{2\Delta x} (|v_x| - v_x), \\
 \bar{d}_{i,j}^n &= \frac{h_{i,j-1}^{n+1}}{0.5\tau} \theta_{i,j}^n + \frac{\xi_1}{\Delta y^2} (D_{i,j-0.5} \theta_{i,j-1}^n - (D_{i,j-0.5} + D_{i,j+0.5}) \theta_{i,j}^n + D_{i,j+0.5} \theta_{i,j+1}^n) - \\
 &\quad - \frac{\xi_2 h_{i,j}^n}{2\Delta y} (2v_y \theta_{i,j}^n - (|v_y| + v_y) \theta_{i,j-1}^n + (|v_y| - v_y) \theta_{i,j+1}^n) + \xi_3 f_{i,j} \theta_{i,j}^n.
 \end{aligned}$$

Ох ўқи бўйлаб изланаётган функция ва ҳайдаш коэффицентларининг чегаравий қийматларини аниқлаш ҳам иккинчи тартибли аниқликда амалга оширилди ва ҳайдаш усули билан  $n + \frac{1}{2}$  – вақт қадами учун ечимлар олинди.

Олинган ечимлар вақтнинг иккинчи ярим қадамида Оу ўқи бўйлаб ҳайдаш усулини қўллаш жараёнида фойдаланилди ва шу тарика  $n + 1$  – кадам учун биринчи яқинлашув итерация натижалари олинди. Итерацион жараёнинг яқинлашиши  $|h_{i,j}^{(s+1)} - h_{i,j}^{(s)}| < \varepsilon$  шартлар ёрдамида текширилди, бу ерда  $\varepsilon$  – итерация жараёнининг аниқлиги;  $s$  – итерациялар сони.

(5)–(7) ҳамда (8)–(12) масалаларни ечиш учун иккинчи тартибли аниқликка эга ошқормас чекли айирмали схемадан фойдаланилди.  $D = \{0 \leq x < L, 0 \leq t \leq J\}$  соҳада ўзгармас  $\Delta x, \Delta \tau$  кадамларга мос тўрни киритамиз:

$$\omega_{\Delta x, \Delta \tau} = \{(x_i, t_j), x_i = i\Delta x; i = \overline{0..I}; t_j = j\Delta \tau; j = \overline{0..J}\}.$$

Олинган чекли айирмали схема  $h$  сатх функциясига нисбатан чизикли бўлмаганлиги сабабли уни ечишда квазичизикли ҳолга келтириб, итерация

усуллари қўлланилган. Натижада (5) ва (8) системалар куйидаги алгебраик тенгламалар системасига келтирилган:

$$a_i h_{i-1}^{j+1} - b_i h_i^{j+1} + c_i h_{i+1}^{j+1} = -d_i, \quad a_i^1 H_{i-1}^{j+1} - b_i^1 H_i^{j+1} + c_i^1 H_{i+1}^{j+1} = -d_i^1, \quad (28)$$

$$\bar{a}_i (\theta_1)_{i-1}^{j+1} - \bar{b}_i (\theta_1)_i^{j+1} + \bar{c}_i (\theta_1)_{i+1}^{j+1} = -\bar{d}_i, \quad \bar{a}_i^1 (\theta_2)_{i-1}^{j+1} - \bar{b}_i^1 (\theta_2)_i^{j+1} + \bar{c}_i^1 (\theta_2)_{i+1}^{j+1} = -\bar{d}_i^1. \quad (29)$$

(28)–(29) тенгламаларнинг озод хади ва коэффициентлари куйидаги муносабатлар ёрдамида аниқланишиди:

$$a_i = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} (k_1)_{i-0.5} \bar{h}, \quad b_i = \frac{\Delta \tau}{2\Delta x^2} (2(k_1)_{i-0.5} \bar{h}_{i-0.5} + 2(k_1)_{i+0.5} \bar{h}_{i-0.5}) + \Delta \tau \xi (k_1)_i \bar{h} + 1,$$

$$c_i = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} (k_1)_{i+0.5} \bar{h}, \quad d_i = h_i^j + \Delta \tau \xi (k_1)_i \bar{h}^2 + \Delta \tau \xi_1 (k_1)_i H_i^j + \Delta \tau \xi_2 (f_i^j - \omega^j),$$

$$a_i^1 = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i-0.5}, \quad b_i^1 = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} (T_{i-0.5} + T_{i+0.5}) - \Delta \tau \varphi_1 (k_2)_i + 1, \quad c_i^1 = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i+0.5},$$

$$d_i^1 = H_i^j + \Delta \tau \varphi_2 (k_2)_i h_i^{j+1} + \Delta \tau \varphi_3 Q_i^j,$$

$$a_i^1 = \frac{0.5\Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i-0.5}, \quad b_i^1 = \frac{0.5\Delta \tau}{\Delta x^2} (T_{i-0.5} + T_{i+0.5}) - 0.5\Delta \tau \varphi_1 (k_2)_i + 1, \quad c_i^1 = \frac{0.5\Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i+0.5},$$

$$\bar{a}_i = \frac{h_i^{j+1}}{\Delta \tau} (\theta_1)_i^j - A_2 f_1 \theta_{1f}, \quad \bar{a}_i = \frac{A}{\Delta x^2} (D_1)_{i-0.5} h_{i-0.5}^{j+1} + \frac{A_1 h_i^{j+1}}{2\Delta x} (|v_x| + v_x),$$

$$\bar{c}_i = \frac{A}{\Delta x^2} (D_1)_{i+0.5} h_{i+0.5}^{j+1} - \frac{A_1 h_i^{j+1}}{2\Delta x} (|v_x| - v_x),$$

$$\bar{b}_i = \frac{h_i^{j+1}}{\Delta \tau} + \frac{A}{\Delta x^2} ((D_1)_{i-0.5} + (D_1)_{i+0.5}) (h_{i-0.5}^{j+1} + h_{i+0.5}^{j+1}) + \frac{A_1 h_i^{j+1}}{\Delta x} v_x,$$

$$\bar{a}_i^1 = \frac{H_i^{j+1}}{\Delta \tau} (\theta_2)_i^j + B_2 f_2 \theta_{2f}, \quad \bar{a}_i^1 = \frac{B}{\Delta x^2} (D_2)_{i-0.5} H_{i-0.5}^{j+1} + \frac{B_1 H_i^{j+1}}{2\Delta x} (|v_x| + v_x),$$

$$\bar{b}_i^1 = \frac{H_i^{j+1}}{\Delta \tau} + \frac{B}{\Delta x^2} ((D_2)_{i-0.5} + (D_2)_{i+0.5}) (H_{i-0.5}^{j+1} + H_{i+0.5}^{j+1}) + \frac{B_1 H_i^{j+1}}{\Delta x} v_x,$$

$$\bar{c}_i^1 = \frac{B}{\Delta x^2} (D_2)_{i+0.5} H_{i+0.5}^{j+1} - \frac{B_1 H_i^{j+1}}{2\Delta x} (|v_x| - v_x).$$

(7) система ва (10)–(12) чегаравий шартлар иккинчи тартибли аниқликда аппроксимация қилиниб,  $\alpha_1, \beta_1, h_i^{j+1}, \bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1, (\theta_1)_{i-1}^{j+1}$  лар топилди.  $h_{i-1}^{j+1}, \dots, h_i^{j+1}$  ҳамда  $(\theta_1)_{i-1}^{j+1}, \dots, (\theta_1)_i^{j+1}$  ларнинг қийматлари тескари хайдаш (прогонка) усули орқали аниқлаб топилди.  $\alpha_1^1, \beta_1^1, H_i^{j+1}, \bar{\alpha}_1^1, \bar{\beta}_1^1, (\theta_2)_{i-1}^{j+1}$  ларнинг қийматлари ҳам юқоридаги алгоритм каби аниқланди.

(13)–(25) масалани ечиш учун иккинчи тартибли аниқликка эга ошқормас чекли айирмали семадан фойдаланилди. Номаълумнинг ўзгариш  $D = \{0 \leq x < L_x, 0 \leq z < L_z, 0 \leq t \leq N\}$  соҳасида  $\Delta x, \Delta z, \Delta \tau$  қадамларга мос тўрни киритамиз:

$$\omega_{\Delta x, \Delta z, \Delta \tau} = \{(x_i, y_j, t_n), x_i = i \Delta x; i = \overline{0..J}; z_j = j \Delta z; j = \overline{0..J}; t_n = n \Delta \tau; n = \overline{0..N}\}.$$

Вақт бўйича  $n + \frac{1}{2}$ ,  $n+1$ -катламларда (13) ва (19) системаларни мос равишда  $Ox$  ва  $Oz$  йўналишларида бўйлаб чегаравий шартларни  $\omega_{\Delta x, \Delta z, \Delta t}$  тўрда ошқормас схемани қўллаб аппроксимация қилинди ва қуйидаги уч диагоналли алгебраик тенгламалар системалари ҳосил қилинди:

$$a_{i,j} h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j} h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -d_{i,j}^n, \quad \bar{a}_{i,j} H_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \bar{b}_{i,j} H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \bar{c}_{i,j} H_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -\bar{d}_{i,j}^n, \quad (30)$$

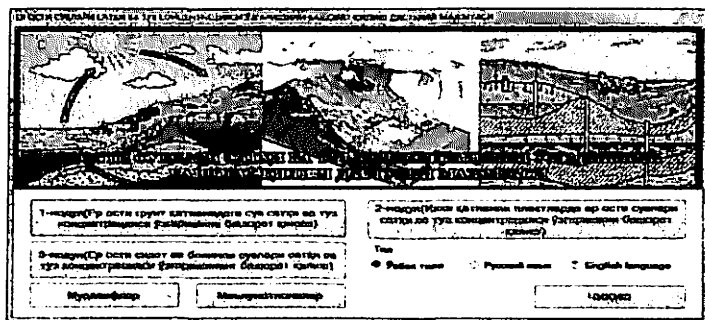
$$\bar{a}_{i,j} (\theta_1)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \bar{b}_{i,j} (\theta_1)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \bar{c}_{i,j} (\theta_1)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -\bar{d}_{i,j}^n, \quad \bar{a}_{i,j} (\theta_2)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \bar{b}_{i,j} (\theta_2)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \bar{c}_{i,j} (\theta_2)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -\bar{d}_{i,j}^n, \quad (31)$$

$$\bar{\bar{a}}_{i,j} h_{i,j-1}^{n+1} - \bar{\bar{b}}_{i,j} h_{i,j}^{n+1} + \bar{\bar{c}}_{i,j} h_{i,j+1}^{n+1} = -\bar{\bar{d}}_{i,j}^n, \quad \bar{\bar{a}}_{i,j} H_{i,j-1}^{n+1} - \bar{\bar{b}}_{i,j} H_{i,j}^{n+1} + \bar{\bar{c}}_{i,j} H_{i,j+1}^{n+1} = -\bar{\bar{d}}_{i,j}^n, \quad (32)$$

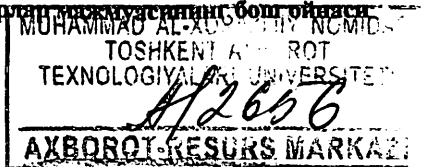
$$\bar{\bar{\bar{a}}}_{i,j} (\theta_1)_{i,j-1}^{n+1} - \bar{\bar{\bar{b}}}_{i,j} (\theta_1)_{i,j}^{n+1} + \bar{\bar{\bar{c}}}_{i,j} (\theta_1)_{i,j+1}^{n+1} = -\bar{\bar{\bar{d}}}_{i,j}^n, \quad \bar{\bar{\bar{a}}}_{i,j} (\theta_2)_{i,j-1}^{n+1} - \bar{\bar{\bar{b}}}_{i,j} (\theta_2)_{i,j}^{n+1} + \bar{\bar{\bar{c}}}_{i,j} (\theta_2)_{i,j+1}^{n+1} = -\bar{\bar{\bar{d}}}_{i,j}^n. \quad (33)$$

Чегаравий шартлар аппроксимациялари ҳамда (30)–(33) уч диагоналли алгебраик тенгламалар системаларидан ва чегаравий шартлардан фойдаланиб,  $\alpha_{i,j}$ ,  $\beta_{i,j}$ ,  $\bar{\alpha}_{i,j}$ ,  $\bar{\beta}_{i,j}$ ,  $\bar{\bar{\alpha}}_{i,j}$ ,  $\bar{\bar{\beta}}_{i,j}$ ,  $\bar{\bar{\bar{\alpha}}}_{i,j}$ ,  $\bar{\bar{\bar{\beta}}}_{i,j}$ ,  $\bar{\alpha}_{i,j}$ ,  $\bar{\beta}_{i,j}$ ,  $\bar{\bar{\alpha}}_{i,j}$ ,  $\bar{\bar{\beta}}_{i,j}$ ,  $\bar{\bar{\bar{\alpha}}}_{i,j}$ ,  $\bar{\bar{\bar{\beta}}}_{i,j}$  – ҳайдаш коэффициентлари;  $h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ ,  $H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ ,  $h_{i,j}^{n+1}$ ,  $H_{i,j}^{n+1}$  – ер ости сизот ва босимли сув сатхларининг чегарадаги қийматлари;  $(\theta_1)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ ,  $(\theta_2)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ ,  $(\theta_1)_{i,j}^{n+1}$ ,  $(\theta_2)_{i,j}^{n+1}$  – туз концентрацияларининг чегарадаги қийматлари топилади.

Диссертациянинг тўртинчи «Ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгаришини башорат қилиш дастурий мажмуаси ҳамда натижалар таҳлили» деб номланган ботида иккинчи бобда келтирилган моделлар учун *WATER1*, *WATER2*, *WATER3* ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилди ва ушбу алгоритмлар асосида дастурий мажмуа яратилди ҳамда ундан фойдаланиш бўйича йўриқнома ва натижалар таҳлили келтирилди.

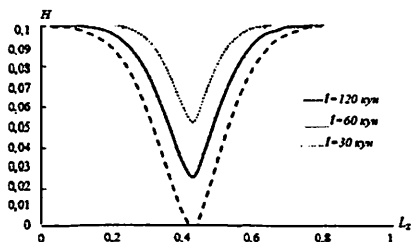


1-расм. Ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгаришини тавсифловчи дастурий мажмуасининг бош ойнаси



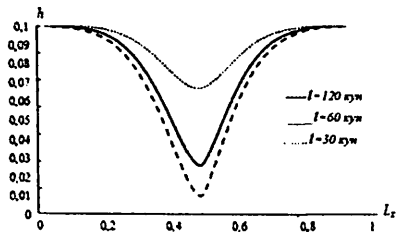


Дастурлар мажмуаси дастурий мажмуа яратишнинг замонавий технологияларидан фойдаланиб амалга оширилди, бир-бирини тўлдирувчи қатор дастурий воситаларни ўз ичига олди.



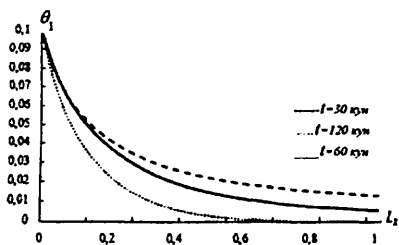
2-расм. Вақтнинг турли қийматларида босимли сув сатҳининг масофа бўйича ўзгариши.

$$f = 0.05, \omega = 0.02, n_0 = 0.07, Q = 0.06$$



3-расм. Вақтнинг турли қийматларида сизот сув сатҳининг масофа бўйича ўзгариши.

$$f = 0.05, \omega = 0.02, n_0 = 0.09, Q = 0.02$$

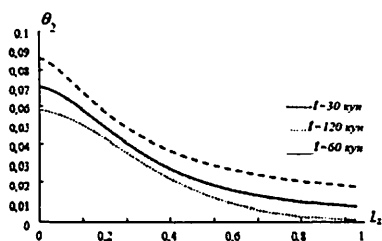


4-расм. Вақтнинг турли қийматларида туз концентрациясининг масофага боғлиқ ўзгариши.

$$(\mu_1 = 0.16, \mu_2 = 0.01, v_x = 0.007, v_z = 0.005,$$

$$D_1 = 0.006 \cdot 10^{-2}, D_2 = 0.007 \cdot 10^{-2},$$

$$\theta_f = 0.00026, \theta_{1f} = 0.0001)$$



5-расм. Вақтнинг турли қийматларида туз концентрациясининг масофага боғлиқ ўзгариши.

$$(\mu_1 = 0.16, \mu_2 = 0.01, v_x = 0.007, v_z = 0.005,$$

$$D_1 = 0.006 \cdot 10^{-2}, D_2 = 0.007 \cdot 10^{-2},$$

$$\theta_f = 0.00026, \theta_{1f} = 0.0001)$$

Ўтказилган сонли ҳисоблашлар акс эттирилган 2 ва 3-расмлардан кўриниб турибдики, ер ости сизот ва босимли сувларининг қатлам узунлигига кўра сатҳи ўзгаришига ташқи манбалар таъсири, буғланиш, шунингдек сизот сувли қатламда тупроқнинг ғовақлиги, дебит каби параметрлар муҳим аҳамиятга эга экан. 4 ва 5-расмларда сизот ва босимли сувларнинг сатҳи ўзгариши таъсирида сизот ва босимли сувли қатламлардаги туз концентрациясининг ўзгаришида эса сув йўқотилиши, филтрация

тезликлари, диффузия коэффициентлари каби параметрлар муҳим аҳамиятга эга экан.

Ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгаришини тавсифловчи дастурлар мажмуаси республикамиз қишлоқ хўжалиги сектори ривожланишида энергия ва меҳнат сарфини камайтириш, атроф-муҳит ҳимояси талабларини бажарган ҳолда ҳосил самарадорлигини ошириш ва ишлаб чиқарилаётган маҳсулотнинг сифатини яхшилашда, ерларнинг мелиоратив ҳолати ҳақида маълумотга эга бўлишда, фильтрация ва сув йўқотилиши коэффициентлари, ташқи манбалар ва уларни ажратиб турувчи қатлам, шунингдек, асосий горизонтнинг ўзгарувчан фильтрация коэффициентига боғлиқ ҳолда ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрациясининг ўзгаришини башорат қилиш имконини беради.

## ХУЛОСА

«Ер ости сувларининг сатҳи ва минераллашуви ўзгаришини башорат қилиш учун геофилтрация жараёнларини сонли моделлаштириш» мавзусида бажарилган диссертация ишининг асосий хулосалари қуйидагича бўлди:

1. Геофилтрация жараёнларининг математик моделларини тузишда, ер ости сувлари ва босимли сувлар сатҳларининг ўзгаришини башорат қилишда фойдаланиш учун ахборот модели ишлаб чиқилган.

2. Ер ости сувлари сатҳи ва минераллашуви ўзгаришини тавсифловчи моделлари таҳлил қилинди ва такомиллаштирилди.

3. Ер ости сувлари ҳаракати назариясига асосан ер ости икки қатламли соҳа геофилтрациясининг математик модели очиқ чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда ишлаб чиқилди.

4. Чекли-айирмалли схема ва ҳайдаш (прогонка) усулларини биргаликда қўллаб, ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгариши масаласини мос бошланғич, чегаравий шартларда ечиш учун вақт ва фазовий ўзгарувчиларга нисбатан юқори тартибли аниқликдаги аппроксимацияга асосланган самарали ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди.

5. Ер ости бир ва икки қатламли муҳитларда сизот ва босимли сувлар сатҳлари ўзгариши ҳамда геофилтрацияси моделларини тадқиқ қилиш учун самарали ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилди;

6. Ер ости бир ва икки қатламли муҳитларда туз концентрацияси ўзгаришининг математик моделларини тадқиқ қилиш учун самарали сонли ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилди;

7. Ер ости сувлари сатҳи ўзгариши ва геофилтрацияси жараёнларининг такомиллаштирилган математик моделларининг самарали сонли ҳисоблаш алгоритмлари асосида ишлаб чиқилган дастурий мажмуани реал объектларга амалиётда қўллаш юзасидан тавсиялар ишлаб чиқилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2019.Т.07.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

---

**САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ДАЛИЕВ ШЕРЗОД КАРШИЕВИЧ**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ  
ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ И  
МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ

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

**Самарканд – 2021**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером В2020.2.PhD/T1572.**

Диссертация выполнена в Самаркандском Государственном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета ([www.tuit.uz](http://www.tuit.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)).

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Равшанов Нормамал</b> доктор технических наук, профессор
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Назирова Элимира Шодмонова</b> доктор технических наук, доцент <b>Болтабаев Шухратжон Комилжанович</b> доктор философии по техническим наукам
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Институт механики и сейсмостойкости сооружений</b>

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2019.T.07.01 при Ташкентском университете информационных технологий. (Адрес: 100200, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер № \_\_\_\_). (Адрес: 100200, г. Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.  
(протокол рассылки №\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.).

**Р.Х.Хамдамов**

Председатель научного совета по присуждению  
учёных степеней, доктор технических наук, профессор

**Ф.М.Нуралiev**

Ученый секретарь научного совета по присуждению  
учёных степеней, доктор технических наук, доцент

**Ш.А. Садуллаева**

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению  
учёных степеней, доктор физико-математических наук, доцент

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире уделяется большое внимание исследованиям процессов изменения уровня и степени минерализации подземных вод. Данная проблема считается актуальной ввиду возрастающей потребности населения в пресной воде и поливной воде, необходимой для нужд сельскохозяйственного сектора. Следует отметить, что орошение сельскохозяйственных земель в Средней Азии, на Кавказе и во многих других регионах мира осуществляется за счет подземных водных источников. Поэтому разработка и усовершенствование математических моделей изменения уровня подземных вод и процессов минерализации, а также эффективных вычислительных алгоритмов решения этих задач являются одной из наиболее актуальных научных проблем. В этом направлении большое внимание уделяется разработке математических моделей и численных алгоритмов для исследования сложных гидродинамических и геофильтрационных процессов в развитых зарубежных странах, в таких как Япония, Дания, Канада, Россия, Индия.

В мире широко проводятся целевые исследования, направленные на изучение движения подземных вод и процессов геофильтрации. К числу основных задач в этом направлении относятся усовершенствование численных моделей и вычислительных алгоритмов процессов изменения уровня грунтовых и напорных вод. Также разработка усовершенствованных математических моделей изменения уровня подземных вод и процессов минерализации в одно- и двухслойных средах, эффективных численных алгоритмов и программных средств является одним из актуальных целевых научных исследований.

В нашей республике особое внимание уделяется разработке мероприятий по усовершенствованию и внедрению в практику математических моделей сложных гидродинамических процессов, связанных с оценкой, мониторингом и прогнозированием состояния подземных водных ресурсов, имеющих важное значение в хозяйственной деятельности. В частности, Постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан от 18 мая 2017 года № 292 «О мерах по организации деятельности вновь созданных научно-исследовательских учреждений Академии наук Республики Узбекистан» предусматривается «...проведение научных исследований по приоритетным направлениям математических наук, таких как математическая физика, прикладная математика и математическое моделирование на уровне международных стандартов...»<sup>1</sup>. При выполнении принятого постановления, в частности, прогнозирование изменения уровня грунтовых вод, очистку сточных вод, усовершенствование математических моделей процессов геофильтрации, создание эффективных алгоритмов и

---

<sup>1</sup> Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 18 мая 2017 года № 292 «О мерах по организации деятельности вновь созданных научно-исследовательских учреждений Академии наук Республики Узбекистан».

программных средств, для проведения вычислительных экспериментов имеют важное значение.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениями Президента Республики Узбекистан № ПП-2954 от 4 мая 2017 года «О мерах по упорядочению контроля и учета рационального использования запасов подземных вод на 2017-2021 годы», № ПП-3682 от 27 апреля 2018 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы практического внедрения инновационных идей, технологий и проектов», № ПП-4708 от 7 мая 2020 года «О мерах по повышению качества образования и развитию научных исследований в области математики» и № ПП-4851 от 6 октября 2020 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы образования в области информационных технологий, развитию и интеграции научных исследований с IT-индустрией» и другими нормативно-правовыми документами.

**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.** Анализ научной литературы по математическому моделированию процессов геофильтрации для исследования движения подземных вод, опубликованных за последние годы, показывает, что в этом направлении был получен ряд значительных результатов теоретического и практического характера.

Фундаментальным аспектам математического моделирования процессов подземной гидродинамики посвящены научные работы А. Дарси, Ф.Форхгеймера, Ж.Дюпюи, Ж.Буссинеска, Н.Е.Жуковского и других зарубежных ученых. Существенный вклад в создание математических моделей процессов изменения уровня и минерализации подземных вод внесли такие исследователи, как П.Я.Полубаринова-Кочина, В.И.Аравина, С.Н.Нумеров, Г.Н.Каменск, А.И.Силина-Бекчурин, П.П.Климентов, Г.Б.Пыхачев, В.А.Мироненко, И.К.Гавич, В.Н.Щелкачев, М.А.Гусейн-заде, В.М.Шестаков, Н.Н.Веригин, И.А.Чарный, Ф.М.Бочеввер, М.С.Хантуш, С.Е.Жакоб, К.Э.Лембке, М.Льюис, Р.Ж.Монтейро, Ч.Н.Рыкрофт, Г.И.Баренблатт, Т.В.Патзек, Д.В.Силин, М.Чраиб, С.Залески, Ф.Франко, С.Аткинсон, Р.А.Исангулов, М.Н.Хамдан и многие другие.

В Узбекистане в области разработки математических моделей геофильтрации, гидродинамических процессов и эффективных численных методов достигнуты значительные научные результаты такими отечественными учеными, как Ф.Б.Абуталиев, Е.Б.Абуталиев, Р.Садуллаев, Дж.Ф.Файзуллаев, Н.Мухидинов, И.Алимов, Б.Хужаёров, Р.Н.Усманов,

Н.Равшанов, В.Ф.Бурнашев, Э.Ш.Назирова, Дж.Джуманов, А.Нематов и другими.

Анализ отраслевых исследований показывает, что необходимы методы исследования, позволяющие глубоко и всестороннее анализировать уровни и степени минерализации грунтовых и напорных вод, оценить меллиоративное состояние земель и изменения ресурсов подземных вод.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ учреждений, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках научных проектов Самаркандского Государственного университета по теме «Математическое моделирование прикладных задач» (2015-2020) и Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий по проектам: №БВ-М-Ф4-001 «Математические модели и эффективные распределенные вычислительные алгоритмы для решения многомерных задач сложного тепломассообмена» (2017-2020) и №БВ-Атех-2018-9 «Разработка моделей, алгоритмов распределенных вычислений и программных средств для решения задач защиты атмосферы и водных ресурсов от техногенных факторов» (2018-2020).

**Целью исследования** является разработка и усовершенствование математических моделей, численных алгоритмов и программного комплекса для прогнозирования изменения уровней и минерализации подземных грунтовых и напорных вод.

**Задачи исследования:**

разработка информационной модели процессов геофильтрации подземных грунтовых и напорных вод;

разработка математической модели процесса изменения уровня подземных вод с учетом пористости грунта, мощности скважин (дебита), а также функциональных взаимосвязей, характеризующих внешние факторы и испарения.

разработка математической модели процесса переноса и диффузии солей в одно- и двухслойных среде с учетом изменения уровня подземных вод, а также общих граничных условий, характеризующих процессы притока и оттока воды;

разработка эффективных численных алгоритмов решения задач об изменении уровней подземных вод и концентрации солей в одно- и двухслойных средах на основе абсолютно устойчивой неявной схемы с высоким порядком точности по времени и пространственным переменным;

разработка программного комплекса для прогнозирования изменений уровня и степени минерализации подземных вод в одно- и двухслойных средах.

**Объектом исследования** является динамика подземных вод в одно- и двухслойных средах, а также процессы геофильтрации.



**Предметом исследования** математические модели, численные алгоритмы и программные комплексы для проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ.

**Методы исследования.** В ходе исследования применялись методы вычислительной математики, математического моделирования и вычислительного эксперимента, а также технологии объектно-ориентированного программирования для разработки программных комплексов.

**Научная новизна исследования** состоит из следующих:

разработана математическая модель процесса изменения уровня подземных грунтовых и напорных вод с учетом функциональных зависимостей, характеризующих внешние факторы и испарения, а также пористости;

усовершенствована математическая модель процесса изменения уровня подземных грунтовых и напорных вод с учетом мощности скважин (дебита) и нелинейных граничных условий третьего рода;

разработана математическая модель процессов переноса и диффузии солей в одно- и двухслойных средах с учетом изменения уровня подземных вод, а также общих граничных условий, характеризующих процессы притока и оттока;

разработаны эффективные численные алгоритмы решения задач прогнозирования изменения уровней подземных вод и концентрации солей в одно- и двухслойных средах на основе абсолютно устойчивой неявной схемы с высоким порядком точности по времени и пространственным переменным.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

разработан программный комплекс для анализа, мониторинга и прогнозирования изменения уровня и степени минерализации подземных вод в одно- и двухслойных средах, учитывающей внешние источники и испарения, пористость грунта и граничные условия третьего рода;

разработанный программный комплекс позволил прогнозировать изменения уровня подземных вод и степень их минерализации и на их основе разработать практические рекомендации по проведению мелиоративных мероприятий.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается тем, что уравнения, описывающие процессы геофильтрации подземных грунтовых и напорных вод в пористых средах, и их краевые условия сформулированы в строгом соответствии с законом сохранения массы и законом Дарси. При использовании численных методов обеспечены необходимые точности аппроксимации, устойчивость и сходимости вычислительного процесса, а результаты расчётов не противоречат физической природе исследуемых процессов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в усовершенствовании математических моделей движения подземных вод в одно- и двухслойных средах с учётом влияния внутренних и внешних

факторов на изменения уровня подземных вод и концентрации солей в них, а также объясняется в разработкой эффективных эффективные численные алгоритм на основе абсолютно устойчивой неявной схемы с высоким порядком точности по времени и пространственным переменным.

Практическая значимость результатов исследования выражается в разработке программного комплекса для мониторинга и прогнозирования процессов геофильтрации, позволяющего сократить время и увеличить точность инженерных расчетов по определению уровня подземных грунтовых вод и степени их минерализации.

**Внедрение результатов исследования.** На основе усовершенствованных математических моделей процессов геофильтрации подземных вод и эффективных численных алгоритмов расчетов:

математическое и программное обеспечения для мониторинга и прогнозирования движения сточных вод, изменения уровня подземных вод и концентрации солей в почвогрунтах по времени внедрены на объектах ГУП «Сувокова» Управления жилищно-коммунального хозяйства Самаркандской области (Справка Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Узбекистан №01/02-1008 от 28 февраля 2020 года). Результаты исследования позволили с помощью обобщенных моделей прогнозировать процесс минерализации воды и просачивания стоков в грунтовые слои, а также изменения уровня воды в зонах водоснабжения, сократить время и трудозатраты инженерных расчетов на 5-6%;

математическое и программное обеспечения для анализа и прогнозирования изменений уровня подземных вод и степени минерализации почвы внедрены на объектах Управлении ирригационных систем Сырдарьинско-Зарафшанского бассейна (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/317 от 15 января 2021 года). В результате обеспечена возможность прогнозирования изменения уровня подземных вод и концентрации почвенных солей, сокращены время и трудозатраты на проведение инженерных расчетов на 3-4%;

математическое и программное обеспечения внедрены на объектах водохранилищ Джизакской области для оценки изменения уровня грунтовых вод (Справка Министерства развития информационных технологий и коммуникаций № 33-8/317 от 15 января 2021 года). В результате с учетом того, что пласты при орошении представляют собой трещиновато-пористую среду, оценено изменение уровня подземных вод при геофильтрации и сокращены время, трудозатраты на инженерные расчеты в 0,2 раза.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационной работы обсуждались на 7 международных и 5 республиканских научных конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликованы 24 научные работы, из них 10 журнальных статей, в том числе 6 в иностранных и 4 в республиканских журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации

основных научных результатов докторских диссертаций, а также получены 2 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит 120 страниц и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении работы обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, соответствие темы исследования приоритетам развития науки и технологий Республики Узбекистан. Сформулированы цель и задачи исследования, описаны объект и предмет исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, даны перечень внедрения результатов исследования в практику, сведения о публикациях и структуре диссертации.

Первая глава диссертации «Анализ математических моделей движения подземных вод и процесса минерализации» содержит подробный анализ научных публикаций в мире и республике, посвященных вопросам математического моделирования и вычислений движения и минерализации подземных вод. Приведены схема этапов математического моделирования и вычислительных экспериментов, примеры аналитического и приближенного решения моделей, описывающих движение подземных вод и процессы их минерализации. На основе проведенного анализа литературных источников и вычислительных методов были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава диссертации «Математическое моделирование задачи прогнозирования изменений уровня подземных вод и концентрации солей в них» посвящена разработке и исследованию математических моделей для прогнозирования изменения уровня подземных вод и процесса изменения концентрации солей в грунтовых и напорных водоносных горизонтах.

В первом параграфе главы изучен сезонный характер факторов, влияющих на уровень и минерализации подземных вод, и приведены некоторые функциональные зависимости.

Для вычисления внешних факторов предложена следующая зависимость

$$f = f_0 + \Delta f \sin \omega t,$$

где  $f_0$  – среднемесячное изменение внешних факторов;  $\Delta f$  – амплитуда годового изменения внешних факторов;  $\omega$  – циклическая частота месячного изменения.

Для вычисления испарения предложена зависимость

$$\omega = \omega_0 + \Delta \omega \sin \omega t,$$

где  $\omega_0$  – среднемесячное изменение испарения,  $\Delta \omega$  – амплитуда годового изменения испарения.

Во втором параграфе, учитывая воздействие внешних факторов и испарения, на основе законов гидродинамики была разработана

математическая модель задачи с учетом процессов конвективного переноса и диффузии, а также изменения уровня грунтовых вод и концентрации солей в них. Для этой модели сформулированы нелинейные граничные условия, характеризующие приток и отток жидкости через границы области расчета. Математическая модель исследуемого процесса описывается следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mu \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + f - \omega, \\ \mu h \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( Dh \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Dh \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) - v_x h \frac{\partial \theta}{\partial x} - v_y h \frac{\partial \theta}{\partial y} + f \theta_f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$h(x, y, t_0) = h_0(x, y), \quad \theta(x, y, t_0) = \theta_0(x, y), \quad \text{при } t = t_0, \quad (2)$$

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

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

$$\mu h \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta - \theta_0), \quad \mu h \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L} = (\theta - \theta_0); \quad (4)$$

$$\mu h \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = -(\theta - \theta_0), \quad \mu h \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L} = (\theta - \theta_0). \quad (4^*)$$

Здесь  $h(x, y, t)$  – уровень грунтовых вод;  $\mu$  – коэффициент водоотдачи;  $k$  – коэффициент фильтрации;  $f$  – внешние факторы;  $\omega$  – испарение;  $\theta(x, y, t)$  – концентрация солей в грунтовых водоносных горизонтах;  $v_x, v_y$  – скорости фильтрации;  $D$  – коэффициент диффузии;  $\theta_f$  – концентрация солей в поступающих инфильтрационных водах;  $h_0(x, y, t_0)$  – начальное распределение уровня грунтовых вод;  $\lambda$  – коэффициент массообмена через границы области;  $\theta_0(x, y, t_0)$  – начальное распределение концентрации солей в грунтовых водоносных горизонтах.

В третьем параграфе приведена математическая модель процесса изменения уровня подземных вод и концентрации солей в двухслойных средах с учетом таких важных параметров, как внешний источник, испарение, пористость грунтового слоя, коэффициент водоотдачи, коэффициенты фильтрации верхнего и нижнего слоев, расход в напорных водоносных горизонтах. Математическая модель процесса описывается нижеследующей системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \mu n_0 \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_0 h \frac{\partial h}{\partial x} \right) - k_1 \frac{h-H}{m} + f - \omega, \\ \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + k_2 \frac{h-H}{m} - \eta Q \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

с соответствующими начальными и открытыми с двух сторон граничными условиями для учета процессов притока и оттока:

$$h_{t=0} = h_0, \quad H_{t=0} = H_0, \quad (6)$$

$$n_0 h \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(h-h_0), \quad n_0 h \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=L} = (h-h_0), \quad \mu \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(H-H_0), \quad \mu^* \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=L} = (H-H_0), \quad (7)$$

где  $h(x,t)$  и  $H(x,t)$  – уровни грунтовых и напорных вод;  $\mu$ ,  $\mu^*$  – коэффициенты водоотдачи;  $m$  – мощность;  $k_1, k_2$  – коэффициенты фильтрации верхнего и нижнего слоя;  $T$  – фильтрационная проводимость основного горизонта;  $Q$  – дебит;  $n_0$  – пористость,  $\eta$  – коэффициент, приводящий модель в размерный вид;  $h_0, H_0$  – начальные значения уровней грунтовых и напорных вод.

В силу изменения уровней грунтовых и напорных вод, процесс распределения концентрации солей в двухслойных средах выражается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mu h \frac{\partial \theta_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right) - v_x h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + f_1 \theta_{1f}, \\ \mu^* H \frac{\partial \theta_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right) - v_x H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} + f_2 \theta_{2f}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Система уравнений (8) решается при следующих начальных и граничных условиях:

$$\theta_1(x,t) \Big|_{t=0} = (\theta_1)_0, \quad \theta_2(x,t) \Big|_{t=0} = (\theta_2)_0, \quad (9)$$

$$\mu h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad \mu h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=L} = (\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad (10)$$

$$\mu^* H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad \mu^* H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = (\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad (11)$$

$$\theta_1(x,t) \Big|_{x=m,-0} = \theta_2(x,t) \Big|_{x=m,+0}, \quad D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=m,-0} = D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=m,+0}. \quad (12)$$

Здесь  $\theta_1(x,t)$ ,  $\theta_2(x,t)$  – концентрации солей в грунтовых и напорных водоносных горизонтах;  $v_x$  – компонента скорости фильтрации;  $D_1, D_2$  – коэффициенты диффузии;  $\theta_{1f}, \theta_{2f}$  – концентрации солей в

инфильтрационной воде);  $(\theta_1)_0, (\theta_2)_0$  – начальные распределения концентрации солей в грунтовых и напорных водоносных горизонтах;  $m_x$  – линия раздела, выбранная вдоль направления  $Ox$ .

В четвертом параграфе, основываясь на результатах анализа гидрогеологических и геофильтрационных процессов, рассмотрена двухслойная среда, состоящая из слоев, разделенных грунтовыми и напорными водами.

Математическая модель процесса изменения уровня подземных грунтовых и напорных воды с учетом пористости грунта, испарения, мощности скважин, функциональных зависимостей, характеризующих внешние факторы, а также притока и оттока сквозь границы области, описывается в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 n_0 \frac{\partial h}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_1 m \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_1 m \frac{\partial h}{\partial z} \right) + k_1 \frac{H-h}{m} + f - \omega, \\ \mu_2 \frac{\partial H}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( k_2 m \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_2 m \frac{\partial H}{\partial z} \right) + k_2 \frac{h-H}{m} - \eta Q, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

которая решается при следующих начальных и граничных условиях:

$$h|_{t=0} = h_0, \quad H|_{t=0} = H_0, \quad (14)$$

$$\mu_1 m \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(h-h_0), \quad \mu_1 m \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = (h-h_0), \quad (15)$$

$$\mu_1 m \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(h-h_0), \quad \mu_1 m \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = (h-h_0), \quad (16)$$

$$\mu_2 m \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(H-H_0), \quad \mu_2 m \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = (H-H_0), \quad (17)$$

$$\mu_2 m \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(H-H_0), \quad \mu_2 m \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = (H-H_0), \quad (18)$$

где  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты водоотдачи;  $k_1, k_2$  – коэффициенты фильтрации верхнего и нижнего слоя.

Математическая модель для описания изменения концентрации солей выражается в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \right) - v_x h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} - v_z h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} + f \theta_f, \\ \mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \right) - v_x H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} - v_z H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} + f \theta_{1f}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Система (19) решается при следующих начальных и граничных условиях:

$$(\theta_1)|_{t=0} = (\theta_1)_0, \quad (\theta_2)|_{t=0} = (\theta_2)_0, \quad (20)$$

$$\mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad \mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = (\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad (21)$$

$$\mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad \mu_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = (\theta_1 - (\theta_1)_0), \quad (22)$$

$$\mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad \mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = (\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad (23)$$

$$\mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = -(\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad \mu_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = (\theta_2 - (\theta_2)_0), \quad (24)$$

$$\theta_1 \Big|_{z=m-0} = \theta_2 \Big|_{z=m+0}, \quad D_1 h \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \Big|_{z=m-0} = D_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial z} \Big|_{z=m+0}. \quad (25)$$

здесь  $v_x, v_y$  – компоненты скорости фильтрации;

Задачи (1)-(25) решены введением безразмерных величин. В этой главе, в целях комплексного изучения рассматриваемых задач, разработаны и совершенствованы математические модели изменения уровня вод в одно- и двухслойных средах. При разработке и совершенствовании математической модели изменения концентрации солей учтены изменения уровней подземных и напорных вод, пористость среды, коэффициенты диффузии, коэффициент водоотдачи, и изменение скорости фильтрации в зависимости от уровней вод и двухстороннего массообмена с соседними слоями. Учитывая возможное влияние начальных условий и массообмена через открытых границ, исследовано экологическое состояние объекта.

Третья глава диссертации «Численные исследованные задачи прогнозирования изменений уровня подземных вод и концентрации солей» посвящена разработке эффективных численных алгоритмов решения задач, сформулированных во второй главе. Так как задачи (1)-(25) выражены системой нелинейных дифференциальных уравнений, то решение их аналитическим способом достаточно сложно. Поэтому при решении их использованы численные методы.

При решении задач (1)-(4\*) использовали конечно-разностный метод. Для этого в область  $D = \{0 \leq x < L_x, 0 \leq y < L_y, 0 \leq t \leq N\}$  введена сетка:

$$\omega_{\Delta x, \Delta y, \Delta t} = \{x = i \Delta x; i = \overline{0..I}; y = j \Delta y; j = \overline{0..J}; t_n = n\tau; n = \overline{0..N}\}.$$

В этой и последующих задачах при дискретизации конвективные члены аппроксимированы по схеме против потока, нелинейные члены упрощены методом квазилинеаризации и для рассматриваемого слоя времени организовали итерационный процесс. Для каждой итерации в  $n+1$ -м временном сечении в  $n + \frac{1}{2}$ -м слое использовали метод прогонки по оси  $Ox$ , а  $n+1$ -м слой – по оси  $Oy$ .

На слое  $n + \frac{1}{2}$  систему (1) и условия (2)-(4\*) на сетке  $\omega_{\Delta x, \Delta y, \Delta t}$  аппроксимировали с применением неявную схему. Так как при применении аппроксимации получится нелинейное относительно  $h$  конечно-разностное

уравнение, то его приводили к квазилинейному виду, применяли метод итерации и представили в виде системы трехдиагональной системы линейных уравнений:

$$a_{i,j} h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j} h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j} h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -d_{i,j}^n \quad (26)$$

$$a_{i,j}^1 \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j}^1 \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j}^1 \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -\bar{d}_{i,j}^n \quad (27)$$

где  $\bar{h}_{i-1,j}, \bar{h}_{i,j}, \bar{h}_{i+1,j}$  – начальные итерационные значения ступенчатой функции;

$$\begin{aligned} a_{i,j} &= k_{i-0.5,j} 2\bar{h}_{i-1,j}, b_{i,j} = \frac{2\Delta x^2}{0.5\tau} + (k_{i-0.5,j} + k_{i+0.5,j}) 2\bar{h}_{i,j}, c_{i,j} = k_{i+0.5,j} 2\bar{h}_{i+1,j}, \\ d_{i,j}^n &= \frac{2\Delta x^2 h_{i,j}^n}{0.5\tau} + (k_{i-0.5,j} + k_{i+0.5,j}) \bar{h}_{i,j}^2 - k_{i+0.5,j} \bar{h}_{i+1,j}^2 + \\ &+ \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \left( k_{i,j-0.5} (2\bar{h}_{i,j-1} h_{i,j-1}^n - \bar{h}_{i,j-1}^2) - \right. \\ &\left. - (k_{i,j-0.5} + k_{i,j+0.5}) (2\bar{h}_{i,j} h_{i,j}^n - \bar{h}_{i,j}^2) \right) + \\ &+ \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \left( k_{i,j+0.5} (2\bar{h}_{i,j+1} h_{i,j+1}^n - \bar{h}_{i,j+1}^2) \right) + 2\Delta x^2 \xi (f_{i,j} - \omega_{i,j}), \\ a_{i,j}^1 &= \frac{\xi_1}{\Delta x^2} D_{i-0.5,j} + \frac{\xi_2 h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} (|v_x| + v_x), b_{i,j}^1 = \frac{h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{0.5\tau} + \frac{\xi_1}{\Delta x^2} (D_{i-0.5,j} + D_{i+0.5,j}) + \frac{\xi_2 h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} v_x, \\ c_{i,j}^1 &= \frac{\xi_1}{\Delta x^2} D_{i+0.5,j} - \frac{\xi_2 h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} (|v_x| - v_x), \\ \bar{d}_{i,j}^n &= \frac{h_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{0.5\tau} \theta_{i,j}^n + \frac{\xi_1}{\Delta y^2} \left( D_{i,j-0.5} \theta_{i,j-1}^n - (D_{i,j-0.5} + D_{i,j+0.5}) \theta_{i,j}^n + D_{i,j+0.5} \theta_{i,j+1}^n \right) - \\ &- \frac{\xi_2 h_{i,j}^n}{2\Delta y} \left( 2v_y \theta_{i,j}^n - (|v_y| + v_y) \theta_{i,j-1}^n + (|v_y| - v_y) \theta_{i,j+1}^n \right) + \xi_3 f_{i,j} \theta_{\beta,j}. \end{aligned}$$

На границе по оси  $Ox$  значения искомой функции и прогоночные коэффициенты также определены со вторым порядком точности и по методу прогонки получены результаты для временного слоя  $n + \frac{1}{2}$ .

Полученные решения использовали для организации прогоночного процесса на  $n+1$ -м слое по оси  $Oy$  и таким образом для  $n+1$ -го шага времени получили результаты первой итерации. Сходимость процесса итерации проверяли с помощью условий  $|h_{i,j}^{(s+1)} - h_{i,j}^{(s)}| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – точность итерации;  $s$  – количество итераций.

При решении задач (5)–(7) и (8)–(12) использована неявная конечно-разностная схема со вторым порядком точности. В области  $D = \{0 \leq x < L, 0 \leq t \leq J\}$  вводим сетку постоянными шагами  $\Delta x, \Delta \tau$ :



$$\omega_{\Delta x, \Delta \tau} = \{(x_i, t_j), x_i = i\Delta x; i = \overline{0..I}; t_j = j\Delta \tau; j = \overline{0..J}\}.$$

Так как применяемая конечная разностная схема является нелинейной относительно ступенчатой функции  $h$ , то при решении она приводится к квазилинейному виду, и применяющие методы итерации. В итоге системы (5) и (8) сводятся к следующим системам алгебраических уравнений:

$$a_i h_{i-1}^{j+1} - b_i h_i^{j+1} + c_i h_{i+1}^{j+1} = -d_i, \quad a_i^1 H_{i-1}^{j+1} - b_i^1 H_i^{j+1} + c_i^1 H_{i+1}^{j+1} = -d_i^1, \quad (28)$$

$$\bar{a}_i (\theta_1)_{i-1}^{j+1} - \bar{b}_i (\theta_1)_i^{j+1} + \bar{c}_i (\theta_1)_{i+1}^{j+1} = -\bar{d}_i, \quad \bar{a}_i^1 (\theta_2)_{i-1}^{j+1} - \bar{b}_i^1 (\theta_2)_i^{j+1} + \bar{c}_i^1 (\theta_2)_{i+1}^{j+1} = -\bar{d}_i^1. \quad (29)$$

Свободные члены и коэффициенты уравнений (28)–(29) определяются в виде следующих зависимостей:

$$a_i = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} (k_1)_{i-0.5} \bar{h}, \quad b_i = \frac{\Delta \tau}{2\Delta x^2} (2(k_1)_{i-0.5} \bar{h}_{i-0.5} + 2(k_1)_{i+0.5} \bar{h}_{i-0.5}) + \Delta \tau \xi(k_1)_i \bar{h} + 1,$$

$$c_i = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} (k_1)_{i+0.5} \bar{h}, \quad d_i = h_i^j + \Delta \tau \xi(k_1)_i \bar{h}^2 + \Delta \tau \xi_1(k_1)_i H_i^j + \Delta \tau \xi_2(f_i^j - \omega_i^j),$$

$$a_i^1 = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i-0.5}, \quad b_i^1 = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} (T_{i-0.5} + T_{i+0.5}) - \Delta \tau \varphi_1(k_2)_i + 1, \quad c_i^1 = \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i+0.5},$$

$$d_i^1 = H_i^j + \Delta \tau \varphi_2(k_2)_i h_i^{j+1} + \Delta \tau \varphi_3 Q_i^j,$$

$$a_i^1 = \frac{0.5\Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i-0.5}, \quad b_i^1 = \frac{0.5\Delta \tau}{\Delta x^2} (T_{i-0.5} + T_{i+0.5}) - 0.5\Delta \tau \varphi_1(k_2)_i + 1, \quad c_i^1 = \frac{0.5\Delta \tau}{\Delta x^2} T_{i+0.5},$$

$$\bar{a}_i = \frac{h_i^{j+1}}{\Delta \tau} (\theta_1)_i^j - A_2 f_1 \theta_{1f}, \quad \bar{a}_i = \frac{A}{\Delta x^2} (D_1)_{i-0.5} h_{i-0.5}^{j+1} + \frac{A_1 h_i^{j+1}}{2\Delta x} (|v_x| + v_x),$$

$$\bar{c}_i = \frac{A}{\Delta x^2} (D_1)_{i+0.5} h_{i+0.5}^{j+1} - \frac{A_1 h_i^{j+1}}{2\Delta x} (|v_x| - v_x),$$

$$\bar{b}_i = \frac{h_i^{j+1}}{\Delta \tau} + \frac{A}{\Delta x^2} ((D_1)_{i-0.5} + (D_1)_{i+0.5}) (h_{i-0.5}^{j+1} + h_{i+0.5}^{j+1}) + \frac{A_1 h_i^{j+1}}{\Delta x} v_x,$$

$$\bar{a}_i^1 = \frac{H_i^{j+1}}{\Delta \tau} (\theta_2)_i^j + B_2 f_2 \theta_{2f}, \quad \bar{a}_i^1 = \frac{B}{\Delta x^2} (D_2)_{i-0.5} H_{i-0.5}^{j+1} + \frac{B_1 H_i^{j+1}}{2\Delta x} (|v_x| + v_x),$$

$$\bar{b}_i^1 = \frac{H_i^{j+1}}{\Delta \tau} + \frac{B}{\Delta x^2} ((D_2)_{i-0.5} + (D_2)_{i+0.5}) (H_{i-0.5}^{j+1} + H_{i+0.5}^{j+1}) + \frac{B_1 H_i^{j+1}}{\Delta x} v_x,$$

$$\bar{c}_i^1 = \frac{B}{\Delta x^2} (D_2)_{i+0.5} H_{i+0.5}^{j+1} - \frac{B_1 H_i^{j+1}}{2\Delta x} (|v_x| - v_x).$$

Граничные условия (10)–(12) системы уравнений (7) аппроксимируются со вторым порядком точности, что позволяет найти  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $h_i^{j+1}$ ,  $\bar{\alpha}_1$ ,  $\bar{\beta}_1$ ,  $(\theta_1)_i^{j+1}$ . Значения  $h_{i-1}^{j+1}, \dots, h_i^{j+1}$  и  $(\theta_1)_{i-1}^{j+1}, \dots, (\theta_1)_i^{j+1}$  найдены методом обратной прогонки. Значения  $\alpha_1^1$ ,  $\beta_1^1$ ,  $H_i^{j+1}$ ,  $\bar{\alpha}_1^1$ ,  $\bar{\beta}_1^1$ ,  $(\theta_2)_i^{j+1}$  найдены аналогичным способом.

Для решения задачи (13)–(25) использована неявная конечно-разностная схема со вторым порядком точности. В область непрерывного изменения

искомых переменных  $D = \{0 \leq x < L_x, 0 \leq z < L_z, 0 \leq t \leq N\}$  вводим сетку с шагами  $\Delta x, \Delta z, \Delta \tau$ :

$$\omega_{\Delta x, \Delta z, \Delta \tau} = \{(x_i, y_j, t_n), x_i = i\Delta x; i = \overline{0..I}; z_j = j\Delta z; j = \overline{0..J}; t_n = n\Delta \tau; n = \overline{0..N}\}.$$

Системы (13) и (19) на временных слоях  $n + \frac{1}{2}$  и  $n+1$ , а также граничные условия аппроксимированы по направлениям  $Ox$  и  $Oz$  соответственно с применением неявной схемы и в результате построены системы с тремя диагоналями:

$$a_{i,j}h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - b_{i,j}h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_{i,j}h_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -d_{i,j}^n, \bar{a}_{i,j}H_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \bar{b}_{i,j}H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \bar{c}_{i,j}H_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -\bar{d}_{i,j}^n, \quad (30)$$

$$\bar{a}_{i,j}(\theta_{1,i-1,j})^{n+\frac{1}{2}} - \bar{b}_{i,j}(\theta_{1,i,j})^{n+\frac{1}{2}} + \bar{c}_{i,j}(\theta_{1,i+1,j})^{n+\frac{1}{2}} = -\bar{d}_{i,j}^n, \tilde{a}_{i,j}(\theta_{2,i-1,j})^{n+\frac{1}{2}} - \tilde{b}_{i,j}(\theta_{2,i,j})^{n+\frac{1}{2}} + \tilde{c}_{i,j}(\theta_{2,i+1,j})^{n+\frac{1}{2}} = -\tilde{d}_{i,j}^n, \quad (31)$$

$$\bar{a}_{i,j}h_{i,j-1}^{n+1} - \bar{b}_{i,j}h_{i,j}^{n+1} + \bar{c}_{i,j}h_{i,j+1}^{n+1} = -\bar{d}_{i,j}^n, \tilde{a}_{i,j}H_{i,j-1}^{n+1} - \tilde{b}_{i,j}H_{i,j}^{n+1} + \tilde{c}_{i,j}H_{i,j+1}^{n+1} = -\tilde{d}_{i,j}^n, \quad (32)$$

$$\bar{\bar{a}}_{i,j}(\theta_{1,i,j-1})^{n+1} - \bar{\bar{b}}_{i,j}(\theta_{1,i,j})^{n+1} + \bar{\bar{c}}_{i,j}(\theta_{1,i,j+1})^{n+1} = -\bar{\bar{d}}_{i,j}^n, \tilde{\tilde{a}}_{i,j}(\theta_{2,i,j-1})^{n+1} - \tilde{\tilde{b}}_{i,j}(\theta_{2,i,j})^{n+1} + \tilde{\tilde{c}}_{i,j}(\theta_{2,i,j+1})^{n+1} = -\tilde{\tilde{d}}_{i,j}^n. \quad (33)$$

Используя граничные условия, а также трехдиагональную систему алгебраических уравнений (30)-(33), находим: коэффициенты прогонки  $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}^n, \bar{\alpha}_{i,j}, \bar{\beta}_{i,j}^n, \bar{\bar{\alpha}}_{i,j}, \bar{\bar{\beta}}_{i,j}^n, \tilde{\alpha}_{i,j}, \tilde{\beta}_{i,j}^n, \tilde{\bar{\alpha}}_{i,j}, \tilde{\bar{\beta}}_{i,j}^n$ ; граничные значения уровней грунтовых и напорных вод  $h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, h_{i,j}^{n+1}, H_{i,j}^{n+1}$ ; значения концентрации соли на границах  $(\theta_{1,i,j})^{n+\frac{1}{2}}, (\theta_{2,i,j})^{n+\frac{1}{2}}, (\theta_{1,i,j})^{n+1}, (\theta_{2,i,j})^{n+1}$ .

В четвертой главе диссертации «Программный комплекс изменения уровня подземных вод и концентрации солей, а также анализ результатов» для моделей из второй главы разработаны вычислительные алгоритмы *WATER1, WATER2, WATER3* и на их основе разработан программный комплекс и приведены рекомендации по использованию комплекса, анализированы полученные результаты.

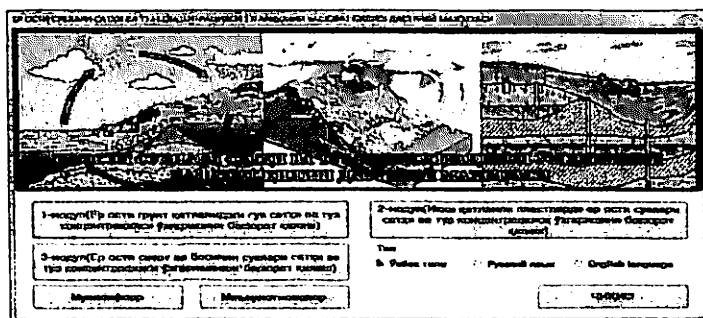
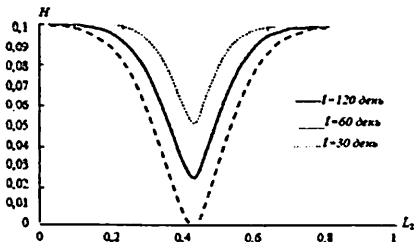
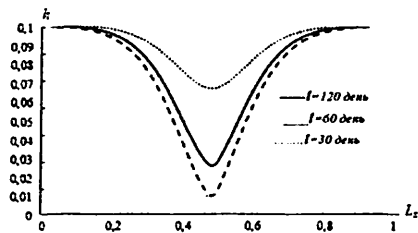


Рис. 1. Главное меню программного комплекса для изучения уровней и степени минерализации подземных вод

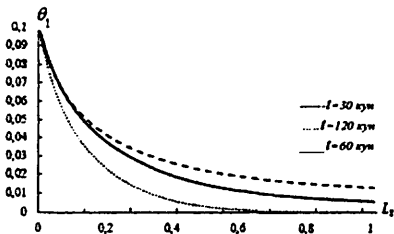
Программный комплекс включает ряд дополняющих друг друга программных средств, реализованных с использованием современных технологий разработки программного обеспечения.



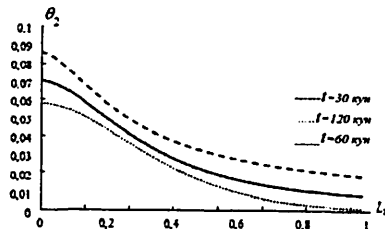
**Рис. 2. Изменение уровня напорных вод по расстоянию при различных моментах времени.**  
 $f = 0.05, \omega = 0.02, n_0 = 0.07, Q = 0.06$



**Рис. 3. Изменение уровня грунтовых вод по расстоянию при различных моментах времени.**  
 $f = 0.05, \omega = 0.02, n_0 = 0.09, Q = 0.02$



**Рис. 4. Изменение концентрации солей по расстоянию при различных моментах времени.**  
 $(\mu_1 = 0.16, \mu_2 = 0.01, v_x = 0.007, v_z = 0.005,$   
 $D_1 = 0.006 \cdot 10^{-2}, D_2 = 0.007 \cdot 10^{-2},$   
 $\theta_f = 0.00026, \theta_{f'} = 0.0001)$



**Рис. 5. Изменение концентрации солей по расстоянию при различных моментах времени.**  
 $(\mu_1 = 0.16, \mu_2 = 0.01, v_x = 0.007, v_z = 0.005,$   
 $D_1 = 0.006 \cdot 10^{-2}, D_2 = 0.007 \cdot 10^{-2},$   
 $\theta_f = 0.00026, \theta_{f'} = 0.0001)$

Как видно из представленных на рис. 2-3 результатов численных расчетов, на изменение уровня грунтовых и напорных вод воздействуют такие параметры, как внешние источники, испарение, а на уровень грунтовых вод – пористость грунта и дебит скважин. На рис. 4 и 5 показано, что под воздействием изменения уровня грунтовых и напорных воды в грунтовых и напорных водоносных горизонтах на изменения концентрации соли влияют следующие параметры: коэффициенты водоотдачи, скорости фильтрации, коэффициенты диффузии.

Комплекс программ для описания уровня и степени минерализации подземных вод позволяет сократить энерго- и трудозатрат при развитии аграрного сектора республики, выполняя требований по защите экологии окружающей среды, повысить урожайность и улучшает качество производимых сельхозпродуктов, накопить информацию о мелиоративном состоянии земель, прогнозировать значений коэффициентов фильтрации и водоотдачи, внешних источников, разделяющих слоев фильтрации, а также проследить за изменением концентрации солей в подземных водах в зависимости от переменного значения коэффициента основного горизонта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертационной работе на тему «Численное моделирование геофильтрационных процессов для прогнозирования изменений уровня и минерализации подземных вод» получены следующие основные результаты:

1. Разработана информационная модель для использования в построении математических моделей процессов геофильтрации и прогнозирования изменения уровня грунтовых и напорных вод.
2. Анализированы и усовершенствованы модели, характеризующие изменения уровня подземных вод и минерализации
3. На основе теории движения подземных вод разработаны математические модели процессов геофильтрации в подземной двухслойной области с учетом двухсторонних граничных условий.
4. Разработан эффективный вычислительный алгоритм на основе аппроксимации высокого порядка по времени и пространственным переменным для решения задачи об изменении уровня подземных вод и концентрации солей при соответствующих начальных и граничных условиях с использованием комбинации методов конечных разностей и прогонки.
5. Разработаны эффективные вычислительные алгоритмы для расчета изменения уровней подземных грунтовых и напорных воды в подземных одно- и двухслойных средах.
6. Разработаны эффективные численные алгоритмы для расчета изменения концентрации солей в подземных одно- и двухслойных средах.
7. Разработаны рекомендации по практическому применению программного комплекса для анализа, мониторинга и прогнозирования изменений уровня и степени минерализации подземных грунтовых вод в одно- и двухслойных средах на реальных объектах агропромышленного сектора и водного хозяйства республики.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.13/30.12.2019.T.07.01 AT TASHKENT UNIVERSITY OF  
INFORMATION TECHNOLOGIES**

---

**SAMARKAND STATE UNIVERSTY**

**DALIEV SHERZOD KARSHIEVICH**

**NUMERICAL MODELING OF GEOFILTRATION PROCESSES FOR  
PREDICTING CHANGES IN THE LEVEL AND MINERALIZATION OF  
GROUNDWATER**

05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software complexes

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

**Samarkand – 2021**

The theme of dissertation of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.2.PhD/T1572.

The dissertation has been prepared at Samarkand State University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website [www.tuit.uz](http://www.tuit.uz) and on the website of «ZiyoNet» Information and Educational portal [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Scientific adviser:** Ravshanov Normakhmad  
doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:** Nazirova Elmira Shodmonovna  
doctor of technical sciences, docent

Boltibaev Shukhratjon Komiljonovich  
doctor of philosophy on technical sciences

**Leading organization:** Institute of mechanics and seismic  
stability of structures

The defense of dissertation will take place on «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council No. DSc.13/30.12.2019.T.07.01 at Tashkent University of Information Technologies (Address: 100200, Tashkent, Amir Temur str., 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52, e-mail: [tuit@tuit.uz](mailto:tuit@tuit.uz)).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Centre of Tashkent University of Information Technologies (is registered under No. \_\_\_\_\_). (Address: 100202, Tashkent, Amir Temur str., 108. Tel.: (+99871) 238-64-43, fax: (+99871) 238-65-52).

Abstract of the dissertation was sent out on «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 y.  
(mailing report № \_\_\_\_\_ of «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 y.).

**R.Kh.Khamdamov**  
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, Docent

**Sh.A.Sadullaeva**  
Chairman of the Scientific Seminar of the  
Scientific Council awarding scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Docent

## **INTRODUCTION (abstract of the PhD thesis)**

**The aim of the research work** is to develop and improve mathematical models, numerical algorithms, and a software package for predicting changes in the levels and mineralization of underground groundwater and pressure water.

**The object of research work** is the dynamics of groundwater in single- and double-layer media, as well as the processes of geofiltration.

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

a mathematical model of the process of changing the level of underground ground and pressure water is developed, taking into account the functional dependencies that characterize external factors and evaporation, as well as porosity;

the mathematical model of the process of changing the level of underground ground and pressure water is improved, taking into account the well capacity (flow rate) and nonlinear boundary conditions of the third kind;

a mathematical model of the processes of salt transport and diffusion in one - and two-layer media is developed, taking into account changes in the level of underground water, as well as general boundary conditions that characterize the processes of inflow and outflow;

effective numerical algorithms for solving problems of forecasting changes in groundwater levels and salt concentrations in one - and two-layer media are developed on the basis of an absolutely stable implicit scheme with a high order of accuracy in time and spatial variables.

**Implementation of the research results.** Based on improved mathematical models of underground water geofiltration processes and effective numerical calculation algorithms:

mathematical and software for monitoring and forecasting the movement of wastewater, changes in the level of underground water and the concentration of salts in soils over time were implemented at the facilities of the Suvokova State Unitary Enterprise of the Department of Housing and Communal Services of the Samarkand Region (Reference of the Ministry of Housing and Communal Services of the Republic of Uzbekistan No. 01/02-1008 dated February 28, 2020). The results of the study made it possible to use generalized models to predict the process of water mineralization and seepage of wastewater into the ground layers, as well as changes in the water level in water supply zones, and to reduce the time and labor costs of engineering calculations by 5-6%;

mathematical and software for analyzing and predicting changes in the level of underground water and the degree of soil mineralization have been implemented at the facilities of the Department of Irrigation Systems of the Syrdarya-Zarafshan Basin (Reference of the Ministry of Information Technology and Communications Development No. 33-8/317 dated January 15, 2021). As a result, it is possible to predict changes in the level of underground water and the concentration of soil salts, and the time and labor costs for engineering calculations are reduced by 3-4%;



mathematical and software solutions were implemented at the reservoir facilities of the Jizzakh region to assess changes in the ground water level (Reference of the Ministry of Information Technology and Communications Development No. 33-8 / 317 dated January 15, 2021). As a result, taking into account the fact that the layers under irrigation are a fractured-porous medium, the change in the level of underground water during geofiltration is estimated and the time and labor costs for engineering calculations are reduced by 0.2 times.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, references and appendices. The volume of the dissertation is 120 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть, I part)**

1. Усманов Р.Н., Далиев Ш.К. Simulink модель для определения параметров линейного водозабора для условий полуограниченного пласта // Мухаммад ал-Хоразмий авлодлари. 2018. – №2(4) – С. 19-21. (05.00.00; №10).
2. Ravshanov N., Zagrebina S.A., Daliev Sh. Numerical simulation of unsteady underground water filtration in a porous medium // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2019. – №4(22) – С. 12-31. (05.00.00; № 23).
3. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Математическая модель для прогнозирования уровня подземных вод в двухслойных пластах // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2019. – № 2(116). – С. 116-124. (05.00.00; № 43)
4. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Разработка математическая модель, вычислительный алгоритм для исследование изменение уровня подземных вод и концентрации солей в них // Проблемы информатики и энергетики. 2020. – №1(25). – С. 16-32. (05.00.00; № 5)
5. Daliev Sh.K., Abdullaeva B., Kubyasev K. Numerical study of filtration process of ground and pressure waters in multilayer porous media // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – London, 2020. – Vol. 896. – 012069 (№3; Scopus, IF=0.54).
6. Ravshanov N., Daliev Sh. Tagaev O. Numerical simulation of two aquifers Horizons // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – India, 2020. – №9(4). – P. 6549-6554. (№3; Scopus, IF=0.58).
7. Ravshanov N., Daliev Sh. Non-linear mathematical model to predict the changes in underground water level and salt concentration // Journal of Physics: Conference Series. – London, 2020. – Vol. 1441. – 012163. (№3; Scopus, IF=0.54).
8. Ravshanov N., Daliev Sh. Abdullaev Z., Khafizov O. Ground and confined underground waters and their salt content// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – London, 2020. – Vol. 896. – 012047. (№3; Scopus, IF=0.54).
9. Daliev Sh.K. Mathematical Modeling to Change the Groundwater Level in the Multilayer Porous Media // International Journal of Advanced Science and Technology. – India, 2020. – №29(7). – P. 3366-3381. (№3; Scopus, IF=0.58).
10. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Математическое моделирование изменения уровней подземных вод и концентраций соли в двухслойных средах // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2021. – №2(32). – С. 94–117. (05.00.00; №23)

## II бўлим (II часть; II part)

11. Усманов Р.Н., Далиев Ш.К. Математическое моделирование и численное решение задачи восстановления запасов подземных вод в однослойных средах // Ахборот коммуниқация технологиялари ва сонли моделлаштиришнинг амалий масалалари : республика илмий-техник конференцияси материаллари тўплами. – Самарқанд, 2017. – Б. 24-26.

12. Усманов Р.Н., Далиев Ш.К. Математическое и численное моделирование задачи опреснения подземных вод в двухслойных средах // Новые результаты математики и их приложения : материалы республиканской научной конференции. – Самарқанд, 2018. – С. 105-107.

13. Далиев Ш.К. Сувли қатламда сув параметрларини аниқлаш учун Симулинк модель // Mathematical analysis and ITS application to mathematical physics : материалы международной научно-практической конференции. – Самарқанд, 2018. – С. 119-121.

14. Далиев Ш.К. Численное исследование процесс фильтрация подземных вод в двухслойных пористых средах // Инновацион гоёлар, ишланмалар ва уларни ишлаб чиқариш ҳамда таълимда қўллашнинг замонавий муаммолари : халқаро илмий-амалий конференция материаллари. – Анижон, 2019. – Б. 653-654.

15. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Моделирование неустановившейся фильтрации подземных вод в пористой среде // Современное состояние и перспективы применения информационных технологий в управлении : материалы республиканской научно-технической конференции. – Самарқанд, 2019. – С. 197-204.

16. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Математическая модель для мониторинга и прогнозирования изменений уровня грунтовых вод и концентрации солей в них // Информатика: проблемы, методы, технологии : материалы XX международной научно-методической конференции. – Воронеж, 2020. – С. 216-232.

17. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Ер ости сувли қатламларда туз концентрацияси ўзгаришини математик моделлаштириш // Инновацион ва замонавий ахборот технологияларини таълим, фан ва бошқарув соҳаларида қўллаш истиқболлари : халқаро илмий-амалий онлайн конференцияси материаллари. – Самарқанд, 2020. – Б. 72-74.

18. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Ер ости сувлари сатхи ўзгаришини математик моделлаштириш асосида тадқиқ қилиш // Инновацион гоёлар, ишланмалар амалиётга: муаммолар ва ечимлар : халқаро илмий-амалий анжуман материаллари. – Анджон, 2020. – Б. 26-29.

19. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Ер ости сизот ва босимли сувлари сатхи ўзгаришини математик моделлаштириш асосида тадқиқ этиш // Математик моделлаштириш, ҳисоблаш математикаси ва дастурий таъминот инженериясининг долзарб муаммолари : республика илмий анжумани материаллари. – Қарши, 2020. – Б. 79-82.

20. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Сизот ва босимли сувли қатламларда туз концентрацияси ўзгаришини математик моделлаштириш // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: муаммолар, тадқиқотлар ва ечимлар : халқаро илмий-амалий анжуман материаллари. – Андижон, 2021. – Б.130-134.
21. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Икки қатламли муҳитларда ер ости сувлари сатҳи ўзгаришини математик моделлаштириш // Инновацион ғоялар, ишланмалар амалиётга: муаммолар, тадқиқотлар ва ечимлар : халқаро илмий-амалий анжуман материаллари. – Андижон, 2021. – Б. 134-138.
22. Далиев Ш.К. Объектни математик моделлаштириш тамойиллари // Ахборот тизимлари ва технологияларининг замонавий жамиятдаги ўрни : республика миқёсидаги илмий-амалий конференция материаллари тўплами. – Наманган, 2021. – Б. 106-108.
23. Равшанов Н., Далиев Ш.К. Икки қатламли муҳитларда ер ости сувлари сатҳи ўзгаришини башорат қилиш учун дастурий таъминот // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк агентлиги. Гувоҳнома № DGU 07448. 26.12.2019.
24. Равшанов Н., Далиев Ш.К., Т.А. Раджабов Ер ости сувлари сатҳи ва туз концентрацияси ўзгаришини башорат қилишнинг инструментал дастурий мажмуаси // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк агентлиги. Гувоҳнома № DGU 10100. 28.01.2021.

**Автореферат «Информатика ва энергетика муаммолари» Ўзбекистон илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва ўзбек, рус тилларидаги матнларини мослиги текширилди.**