

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'IY INTELLEKTNI
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'IY INTELLEKTNI
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

AXMEDJANOVA ZARRINA ISKANDAROVNA

**EVOLYUTSION GIBRID QIDIRUV ASOSIDA TRANSPORT
LOGISTIKASI AXBOROT TIZIMI MA'LUMOTLARNING O'ZARO
TA'SIR MODELLARI VA ALGORITMLARI**

05.01.03 – Informatikaning nazariy asoslari

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

Toshkent – 2026

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

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

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

Axmedjanova Zarrina Iskandarovna

Evolyutsion gibrid qidiruv asosida transport logistikasi axborot tizimi
ma'lumotlarning o'zaro ta'sir modellari va algoritmlari.....5

Ахмеджанова Заррина Искандаровна

Модели и алгоритмы взаимодействия данных информационной системы
транспортной логистики на основе эволюционного гибридного поиска.....21

Axmedjanova Zarrina Iskandarovna

Models and algorithms based on evolutionary hybrid search for data interaction in
transport logistics information systems.....39

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works.....42

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'IY INTELLEKTNI
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M RAQAMLI
ILMIY KENGASH**

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'IY INTELLEKTNI
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

AXMEDJANOVA ZARRINA ISKANDAROVNA

**EVOLYUTSION GIBRID QIDIRUV ASOSIDA TRANSPORT
LOGISTIKASI AXBOROT TIZIMI MA'LUMOTLARNING O'ZARO
TA'SIR MODELLARI VA ALGORITMLARI**

05.01.03 – Informatikaning nazariy asoslari

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

Toshkent – 2026

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.2.PhD/T5624 raqam bilan ro'yxatga olingan.

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

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

Ilmiy rahbar:	Sulyukova Larisa Faritovna texnika fanlari doktori (Dsc), katta ilmiy xodim
Rasmiy opponentlar:	Tashev Azat Aripovich (Qozog'iston) texnika fanlari doktori (Dsc), professor Muxamediyeva Dilnoz Tulkunovna texnika fanlari doktori (Dsc), professor
Yetakchi tashkilot:	Toshkent davlat transport universiteti

Dissertatsiya himoyasi Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti huzuridagi DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil " _____ " _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent shahri, M. Ulug'bek tuman, Bo'z-2 mavzesi, 17A uy. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: info@airi.uz).

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

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil " _____ " _____ kunida tarqatildi.
(2026-yil " _____ " _____ dagi _____ raqamli reestr bayonnomasi.)

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

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

N. Mirzayev
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi,
texnika fanlari doktori, professor

KIRISH (falsafa fan doktori (Phd) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda iqtisodiyotning raqamli o'zgarishi va intellektual axborot texnologiyalarining jadal joriy etilishi sharoitida transport-logistika jarayonlarini boshqarishda axborot tizimlarining ahamiyati tobora ortib bormoqda. Zamonaviy transport logistikasi axborot tizimlari yuqori darajadagi noaniqlik va murakkab o'zaro ta'sir tuzilishiga ega bo'lgan katta hajmdagi turli xil va tez o'zgaruvchan ma'lumotlarni qayta ishlash sharoitida ishlaydi. Bu esa qaror qabul qilish samaradorligi va tizimlar faoliyatining barqarorligini ta'minlaydigan ma'lumotlar o'zaro ta'sirining yangi nazariy asoslangan modellari va algoritmlarini ishlab chiqishni taqozo etadi.

Jahonda transport logistikasi masalalarini evolyutsion hisoblashlar va gibridd algoritmlar yordamida hal etish usullarini takomillashtirishga qaratilgan tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu tadqiqotlar, ayniqsa, AQSH, Xitoy, Yevropa Ittifoqi mamlakatlari (Germaniya, Fransiya, Niderlandiya), Yaponiya va Janubiy Koreyada faol amalga oshirilmoqda. Ushbu mamlakatlarning yetakchi ilmiy markazlari va universitetlari marshrutlashtirish muammolarini hal qilishda innovatsion yondashuvlarni ishlab chiqmoqda. DHL, FedEx, UPS, Amazon Logistics kabi yirik logistika kompaniyalari va korporatsiyalari genetik, chumoli algoritmlari va boshqa metaevristikalardan foydalangan holda intellektual marshrutlarni optimallashtirish tizimlarini faol joriy etmoqda. Cheklovlar sharoitida o'z vaqtida yetkazib berishni talab qiladigan yuk tashishni optimallashtirish hal qiluvchi vazifaga aylanmoqda. Shu bois, transport vositalari marshrutini optimallashtirishning matematik modellari, usullari va algoritmlarini ishlab chiqish va takomillashtirish tadqiqotlarning ustuvor yo'nalishlaridan biriga aylanmoqda.

O'zbekiston Respublikasida transport-logistika infratuzilmasini rivojlantirishga va yuk tashishni boshqarish uchun axborot texnologiyalarini joriy etishga alohida e'tibor qaratilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining "2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi farmonida¹ iqtisodiyot tarmoqlarini raqamlashtirish, intellektual axborot tizimlarini joriy etish hamda transport infratuzilmasini zamonaviy axborot-kommunikatsiya texnologiyalari asosida rivojlantirishga alohida e'tibor qaratilgan. Unda transport va logistika jarayonlarini boshqarish samaradorligini oshirish, qaror qabul qilishni avtomatlashtirish hamda raqamli platformalarni joriy etish zarurligi ta'kidlanadi. Prezidentning 2025-yil 27-yanvardagi "O'zbekiston Respublikasining transport-logistika tizimini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-28-sonli qarorida transportni boshqarishning intellektual tizimlarini ishlab chiqish zaruriyatiga doir vazifalar belgilangan. Ko'rsatilgan vazifalarning ijrosi quyidagilarni nazarda tutadi: yuk tashish xususiyatlarini inobatga oluvchi marshrutlash masalalarining matematik modellarini ishlab chiqish, optimallashtirishning samarali evolyutsion algoritmlarini yaratish, shuningdek, marshrutlarni rejalashtirish va tashuvlarni tezkor boshqarishni ta'minlovchi

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi "2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son Farmoni

transport logistikasi axborot tizimlarini ishlab chiqish hamda amaliyotga tatbiq etish.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 21-oktyabrdagi PF-6091-son "Eksport faoliyatini moliyaviy qo'llab-quvvatlashni yanada kengaytirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi, 2020-yil 5-oktyabrdagi PF-6079-son "Raqamli O'zbekiston - 2030" strategiyasini tasdiqlash va uni samarali amalga oshirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi, 2020-yil 18-avgustdagi PF-6042-son "Respublikaning eksport va investitsiya salohiyatini yanada rivojlantirishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi, 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi farmonlari, 2025-yil 27-yanvardagi PQ-28-son "O'zbekiston Respublikasining transport-logistika tizimini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarori hamda mazkur sohaga oid boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining IV "Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish" ustuvor yo'nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Kombinatorli optimallashtirish va intellektual marshrutlash masalalarining nazariy asoslariga G. B. Dantzig va J. H. Ramser, P. Toth va D. Vigo, G. Laporte, J.-F. Cordeau, T. Crainic va M. Gendreau kabi xorijiy olimlarning ko'plab ishlari bag'ishlangan. Evolyutsion optimallashtirish algoritmlari D.E. Goldberg, Z. Michalewicz, K. Deb rahbarligidagi ilmiy maktablar tomonidan, gibrid metaevristika sohasida esa C. Blum, M. Dorigo, T. Stützle tomonidan faol ishlab chiqilmoqda. G.I. Braverman, Yu.G. Yevtushenko, V.G. Xachatryan, A.A. Lapin ishlarida evristik va gibrid usullarni ishlab chiqish, shuningdek, ularni qaror qabul qilishni qo'llab-quvvatlash tizimlarida qo'llash masalalari ko'rib chiqilgan.

O'zbekiston Respublikasida kombinator optimallashtirish masalalarini yechishning nazariy va amaliy yondashuvlarini, shuningdek, ma'lumotlar tahlili va algoritmlashtirishning nazariy asoslarini rivojlantirishga Sh.X. Fozilov, N.S. Mamatov, N.M. Mirzayev, S.S. Rajabov, D.T. Muxamediyeva, L.F. Sulyukova, J.R. Abdurazzaqov kabi olimlar salmoqli hissa qo'shgan. Shu bilan birga, cheklovlarga ega ma'lumotlarning o'zaro ta'siri muammolari uchun ixtisoslashtirilgan modellarni yaratish hamda ishlab chiqilgan model va algoritmlarni axborot tizimlariga integratsiya qilish masalalari yetarlicha o'rganilmaganligicha qolmoqda.

Dissertatsiya tadqiqotining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi: Dissertatsiya tadqiqoti Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti va Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Samarqand filialining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari muvofiq № A-OT-2021-108 "Taqsimlangan tizimlarda qaror qabul qilishni monitoring qilish, bashoratlash va qo'llab-quvvatlashning axborot-tahliliy usullarini ishlab chiqish" (2021-2023 yy.), № B-2023-27 "Yuqori aniqlikdagi detallarga mexanik ishlov berish jarayonlarini raqamli loyihalash" (2023-2024 yy.) loyihalari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi o‘z-o‘zini moslashtirish mexanizmlariga ega evolyutsion gibridd yondashuv asosida transport yo‘nalishlarini belgilash masalalarini hal etish model va algoritmlarini ishlab chiqishdir.

Tadqiqotning vazifalari:

transport logistikasining axborot tizimlarini, marshrutlash vazifalari tasnifini va ularni hal etish usullarini tahlil qilish;

transport marshrutizatsiyasi masalasi modeli uchun vaqt qatlami konsepsiyasini ishlab chiqish;

murakkab cheklovlarga ega marshrutlash masalasi uchun algoritmni takomillashtirish;

cheklangan yuk ko‘tarish qobiliyati, vaqt oynalari va yuklash/tushirish ketma-ketligi cheklovlari bilan transport vositalarini yo‘naltirishning matematik modelini ishlab chiqish;

evolyutsion qidiruvni to‘xtatishning qat’iy kompleks mezonini asosida mahalliy yaxshilashga asoslangan o‘z-o‘zini moslashtiradigan gibridd evolyutsion algoritmni ishlab chiqish;

ishlab chiqilgan model va algoritmlarni standart test to‘plamlari va haqiqiy ma’lumotlar asosida tajribaviy tadqiq etish va logistik rejalashtirishning to‘liq jarayonini ta’minlovchi dasturiy majmuani ishlab chiqish.

Tadqiqot obyekti transportni marshrutlashning kombinatorli optimallashtirish masalalari hisoblanadi.

Tadqiqot predmeti transport vositalarini marshrutlashning kombinatorli optimallashtirish masalalarini yechish uchun matematik modellar, evolyutsion gibridd algoritmlar, axborot tizimlarida ma’lumotlarning o‘z-o‘zini moslashtirish va o‘zaro ta’sir usullaridan iborat.

Tadqiqot usullari. Ish jarayonida nazariy informatika va algoritmlar nazariyasi, matematik modellashtirish va kombinatorli optimallashtirish, evolyutsion hisoblash va mahalliy qidiruv usullari, shuningdek ehtimollar nazariyasi va obyektga yo‘naltirilgan dasturlash usullaridan foydalanildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

transport tarmog‘i parametrlarining dinamik o‘zgarishlarini modellashtirish asosida vaqtinchalik qatlam konsepsiyasini ishlab chiqildi;

vaqt murakkabligini saqlagan holda yechimlar sifatini 8-12% ga yaxshilashni ta’minlaydigan vaqt qatlamlarini hisobga oluvchi modifikatsiyalangan chumolilar koloniyasi algoritmi ishlab chiqildi;

LIFO tamoyilini hisobga olgan holda qishloq xo‘jaligi logistikasining o‘ziga xos xususiyatlariga moslashtirilgan murakkab cheklovlarga ega transport vositalarini marshrutlash masalasining matematik modeli ishlab chiqildi;

differensial evolyutsiya, genetik algoritmlar hamda parametrlarni o‘z-o‘zidan moslashtirish mexanizmiga ega lokal qidiruv asosida gibridd evolyutsion algoritmni ishlab chiqildi.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat: uch pog‘onali arxitektura doirasida amalga oshirilgan va ma’lum eng yaxshi yechimlardan o‘rtacha chetlanishi 0,9% dan oshmaydigan murakkab marshrutlash masalalarini yechish uchun modifikatsiyalangan chumolilar koloniyasi algoritmi va parametrlarni o‘z-

o'ziga moslashtiruvchi gibridd evolyutsion algoritmi o'z ichiga olgan transport logistikasi axborot tizimining algoritmik va dasturiy ta'minoti ishlab chiqildi; olingan natijalarning joriy etilishi xizmat ko'rsatish ketma-ketligi cheklovlarining buzilishlarini to'liq bartaraf etgan holda transport xarajatlarini 14,3% ga, transport vositalariga bo'lgan ehtiyojni 17% gacha kamaytirishni va rejalashtirish vaqtini qisqartirishni tasdiqladi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi matematik modellarning to'g'riligi, masala va algoritmlarning qat'iy formallashtirilganligi, kombinatorli optimallashtirish usullarining qo'llanilishi, test ma'lumotlari bo'yicha o'tkazilgan hisoblash tajribalari, ma'lum usullar bilan taqqoslanishi va natijalarning takrorlanuvchanligi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Ilmiy ahamiyat transport logistikasi axborot tizimi ma'lumotlarining o'zaro ta'sir modellari va ularni qayta ishlash hamda optimallashtirishning evolyutsion gibridd algoritmi ishlab chiqilganligida namoyon bo'ladi. Chumolilar koloniyasi algoritmidagi ehtimollar taqsimoti uchun nafaqat eng yaxshi, balki eng yomon yechimlarni ham hisobga oluvchi modifikatsiyalangan formula taklif etildi, bu esa erta yaqinlashishning oldini oladi. Differensial evolyutsiya, genetik operatorlar va mahalliy qidiruvni parametrlarning o'z-o'zini moslashtirish mexanizmlari bilan integratsiyalovchi adaptiv gibridd algoritmi samaradorligi nazariy jihatdan asoslandi.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati ishlab chiqilgan model va algoritmlarni transport logistikasi axborot tizimlari, qaror qabul qilishni qo'llab-quvvatlash tizimlari va intellektual transport tizimlarini yaratishda qo'llash mumkinligida namoyon bo'ladi. Taklif etilgan algoritmik yechimlardan marshrutlarni rejalashtirish samaradorligini oshirish, ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish va logistik jarayonlarni boshqarish sifatini yaxshilashda foydalanish mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Cheklovli marshrutlash masalalarining ishlab chiqilgan matematik modellari va evolyutsion gibridd qidiruv algoritmlari asosida:

yuk tashishni boshqarishning axborot tizimi "Samarkand Logistics" MCHJning amaliy faoliyatiga joriy etildi (O'zbekiston Respublikasi Samarqand viloyati hokimligining 2025-yil 1-dekabrda 02-02/8133-son ma'lumotnomasi). Natijada tashish hajmini saqlab qolgan holda logistika xarajatlarini 8-12% ga kamaytirish, yo'nalishlarni shakllantirishni 5-7% ga tezlashtirish va transport vositalari sonini 10-15% ga qisqartirish imkonini berdi;

yuk ko'tarish qobiliyatining murakkab cheklovlari, vaqt oraliqlarini va LIFO tamoyili bo'yicha operatsiyalar ketma-ketligini hisobga olgan holda yo'nalishlarni optimallashtirish dasturiy majmuasi "Coca-Cola Ichimligi Uzbekistan LTD" MCHJga joriy etildi (O'zbekiston Respublikasi Samarqand viloyati hokimligining 2025-yil 1-yanvarda 02-02/8133-sonli ma'lumotnomasi). Bu majmua 25 tagacha transport vositasidan foydalanilganda 200 tagacha buyurtmani avtomatik qayta ishlash, logistika xarajatlarini kamaytirish, ERP tizimi bilan integratsiyalashuvni ta'minlash va 1,4% o'zgaruvchanlik koeffitsiyenti bilan yechimlar barqarorligini ta'minlash imkonini berdi;

parametrlarning o‘z-o‘zini moslashtirish va qidiruv strategiyalarini avtomatik tanlash mexanizmlariga ega adaptiv gibrid evolyutsion algoritm asosida yaratilgan dasturiy majmua "Marokand Khumo Services" MCHJ amaliy faoliyatiga joriy etildi (O‘zbekiston Respublikasi Samarqand viloyati hokimligining 2025-yil 1-yanvardagi 02-02/8133-sonli ma’lumotnomasi). Bu majmua yo‘nalishlarni shakllantirish va buyurtmalarni taqsimlashni 5-7% ga tezlashtirish hamda bo‘linmalar o‘rtasidagi samarali muvofiqlashtiruvni ta’minlash imkonini berdi.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Ushbu tadqiqot natijalari 7 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy anjumanlarida muhokama qilindi.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 20 ta ilmiy ish nashr etilgan bo‘lib, ulardan 7 tasi O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan dissertatsiyalarning asosiy ilmiy natijalarini e‘lon qilish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlardagi maqolalardir. Jumladan, 3 ta maqola xorijiy (shundan 2 tasi “Scopus” bazasida indekslangan) va 5 tasi respublika jurnallarida chop etilgan. Shuningdek, EHM uchun yaratilgan dasturlarga 2 ta rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganlik to‘g‘risidagi guvohnoma olingan.

Ishning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirishda dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslanib, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obykti va predmeti belgilangan, tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, ilmiy yangilik, tadqiqotning amaliy natijalari bayon etilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, tadqiqot natijalarining nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy etish, natijalarning nashr etilganligi va dissertatsiya tuzilishi haqida ma’lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning «**Axborot tizimlari va ma’lumotlarga ishlov berish algoritmlari tahlili**» nomli birinchi bobi transport vositalarini marshrutlash masalalarining nazariy va amaliy jihatlarini o‘rganishga hamda transport logistikasi axborot tizimlarining (AT) o‘zaro ta’siri muammolarini tahlil qilishga bag‘ishlangan. Bobda transport vositalarini marshrutlash (VRP) masalalarining asosiy sinflari va ularning kengaytmalari ko‘rib chiqilgan. VRP turkumidagi masalalar tashishlarni boshqarish tizimlarining asosini tashkil etishi, biroq ko‘plab turli-tuman cheklovlar tufayli yuqori kombinator murakkablik bilan ajralib turishi ko‘rsatib o‘tilgan. Asosiy modellar (CVRP, VRPTW, MDVRP) amaliyotda keng qo‘llanilsa-da, qishloq xo‘jaligi tashishlariga xos bo‘lgan o‘ziga xos xususiyatlarni - mavsumiylik, mahsulotning tez ayniydiganligi, hududiy tarqoqlik va qat’iy vaqt oraliq‘ida xizmat ko‘rsatish kabilarni to‘liq hisobga olishni ta’minlamaydi. Mavjud axborot tizimlari tahlili shuni ko‘rsatdiki, ularning aksariyati masalalarning statik qo‘yilishiga yo‘naltirilgan bo‘lib, yopiq yoki moslashuvchanligi past algoritmlardan foydalanadi. Bu esa ularni yuqori o‘lchamli va dinamik sharoitlarda qo‘llashni cheklaydi hamda yangi algoritmik yondashuvlarni integratsiya qilishni

murakkablashtiradi. Transport logistikasida optimallashtirish masalalarini yechishning aniq, evristik, metaevristik va gibril yondashuvlar kabi usullari tahlil qilingan.

1-jadvalda masala o'Ichami ortishi bilan turli marshrutlash algoritmlari uchun topilgan yechimlarning optimal qiymatdan og'ish bog'liqligi keltirilgan.

1-jadval

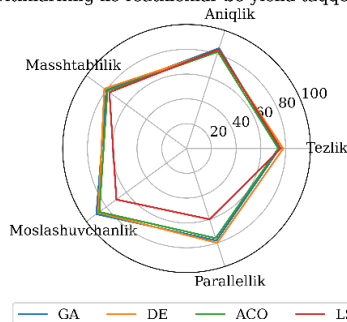
Optimal yechimdan og'ish (%)

Tugunlar soni	GA	DE	ACO	LS
2	0,2	0,3	0,5	0,4
10	1,5	1,8	2,5	2,1
50	4,2	4,8	5,8	5,2
100	5,5	6,2	7,5	6,8

Natijalar tahlili shuni ko'rsatadiki, genetik algoritmlar masala o'Ichamining o'sishi bilan differensial evolyutsiya, chumoli algoritmlari va mahalliy qidiruv usullariga nisbatan o'rtacha chetlanishning pastroq darajasini ta'minlaydi.

1-rasmda marshrutlashni optimallashtirishning genetik (GA), differensial evolyutsiya (DE), chumolilar koloniyasining klassik (ACO) hamda lokal qidiruv (LS) algoritmlari hisoblash murakkabligi, yechimlar aniqligi, moslashuvchanlik va yaqinlashish tezligi kabi ko'rsatkichlar bo'yicha ko'p mezonli taqqoslanishi tasvirlangan.

Algoritmlarning ko'rsatkichlar bo'yicha taqqoslanishi



1-rasm. Ko'p mezonli taqqoslash.

Diagramma shuni ko'rsatadiki, evolyutsion algoritmlar yechimlar sifati va hisoblash xarajatlari o'rtasidagi mutanosiblikni ta'minlaydi. Bu esa ularni gibril usullar tarkibida qo'llash maqsadga muvofiq ekanini tasdiqlaydi. Aniq usullar hisoblash murakkabligining eksponensial o'sishi sababli real o'Ichamdagi masalalar uchun qo'llanila olmasligi, evristik usullar esa yechimlarning talab darajasidagi sifati va barqarorligini ta'minlamasligi aniqlandi. Marshrutlash masalalari tahlili gibril metaevristik algoritmlarning samaradorligini ko'rsatdi, bu esa tegishli yondashuv tanlanganini asoslaydi.

Shunday qilib, birinchi bobda murakkab cheklovlarga ega kengaytirilgan marshrutlashning matematik modelini hamda ixtisoslashtirilgan optimallashtirish algoritmlarini ishlab chiqish zarurati asoslab berildi, bu esa tadqiqotning mazmuni va yo'nalishini belgilaydi.

Dissertatsiyaning "Transport logistikasi axborot tizimi ma'lumotlarining o'zaro ta'siri matematik modellari va algoritmlari" deb nomlangan ikkinchi bobi

transport logistikasi ATning matematik va algoritmik ta'minotini ishlab chiqish hamda tadqiq etishga bag'ishlangan.

2.1-paragrafda NP-qiyin sinfiga mansub resurs va tarkibiy cheklovlarga ega yo'naltirilgan grafda diskret optimallashtirish masalasi sifatida marshrutlash masalasining rasmiy qo'yilishi keltirilgan. Model binar o'zgaruvchilar va chiziqli bog'liqlik cheklovlarini kiritishga asoslangan Miller-Taker-Zemlin yondashuvidan foydalangan holda butun sonli chiziqli dasturlash atamalarida shakllantirilgan. Bu esa algoritmik amalga oshirish va nazariy tahlil qilish imkoniyatini ta'minlaydi.

2.2-paragrafda transport tarmog'ining vaqt dinamikasini hisobga olish mexanizmi sifatida vaqt qatlami konsepsiyasi taklif etilgan. Asosiy g'oya shundan iboratki, yo'l grafi yoylarining parametrlarini bitta qiymat bilan emas, balki harakat rejimlarini aks ettiruvchi vaqt oraliqlaridagi (qatlamlaridagi) qiymatlar to'plami bilan modellashtirish maqsadga muvofiqdir. Vaqt qatlamining matematik formallashtirishi quyidagicha aniqlanadi:

Rejalashtirishning ko'rib chiqilayotgan davri (masalan, yil, oy, hafta) $T = [0, T_{max}]$ bo'lsin. Vaqt qatlami quyidagicha bo'linish sifatida aniqlanadi:

$$T = \bigcup_{k=1}^K T_k, \text{ bunda } T_i \cap T_j = \emptyset \text{ agar } i \neq j, \quad (1)$$

bu yerda T_k - k -vaqt qatlami, K - vaqt qatlamlarining umumiy soni.

Har bir T_k vaqt qatlami uchun quyidagi parametrlar to'plami aniqlanadi:

$$\Theta_k = \{v_{ij}^k, c_{ij}^k, s_i^k\}, \quad (2)$$

bu yerda $v_{ij}^{(k)}$ - k qatlamdagi (i, j) yoy bo'ylab harakatlanishning o'rtacha tezligi; c_{ij}^k - k qatlamdagi (i, j) yoy bo'ylab harakatlanish narxi; s_i^k - k qatlamdagi i mijozga xizmat ko'rsatish vaqti.

Vaqt qatlamining qo'llanilish sharti quyidagicha:

$$\frac{c_{ij}^k - \bar{c}_{ij}}{\bar{c}_{ij}} \leq \varepsilon, \quad (3)$$

bu yerda \bar{c}_{ij} - T davr uchun (i, j) yoy bo'ylab yo'l haqining o'rtacha qiymati, ε - ruxsat etilgan nisbiy og'ish, $\varepsilon \in [0.05, 0.15]$.

Vaqt qatlami konsepsiyasining qo'llanilishini aniqlashda asosiy miqdoriy ko'rsatkich sifatida yoyning vaqt bo'yicha o'zgaruvchanlik koeffitsiyenti (CV) qo'llaniladi. Bu yerda - yoy bo'ylab harakatlanish qiymatining o'rtacha kvadratik og'ishi, esa - uning o'rtacha qiymati.

Marshrutlash masalalarida ushbu konsepsiyani qo'llash maqsadga muvofiqligini belgilovchi koeffitsiyenti bo'yicha transport tarmoqlarining tasnifi taklif etildi. Vaqt bo'yicha o'zgaruvchanlik koeffitsiyenti yo'l turlari va kun davrlariga qarab sezilarli darajada farqlanadi. Masalan, tig'iz vaqtlarda shahar markazida CV 0,60-0,75 ga yetsa, shahar tashqarisidagi yo'llarda CV < 0,15 ni tashkil etadi. Bu holat tarmoq parametrlarining yaqqol ifodalangan vaqt dinamikasiga ega ekanini tasdiqlaydi va transport tizimining o'zgaruvchan graf

strukturasini rasman hisobga olish uchun vaqt qatlami konsepsiyasini joriy etishni asoslaydi.

Vaqt bo'yicha o'zgaruvchanlik koeffitsiyenti, o'zgarishlarning davriyligi va iqtisodiy samaradorlik ko'rsatkichlari asosida turli turdagi transport tarmoqlari uchun vaqt qatlami konsepsiyasini qo'llashning matematik mezonlari shakllantirildi.

Vaqt qatlamlari soni va chegaralarini avtomatik aniqlash uchun qiymatlarning vaqt qatorlarini normallashtirish, vaqt lahzalarini vektorlashtirish va ularni K-means++ usuli bilan klasterlashni o'z ichiga olgan algoritmi ishlab chiqildi. Klasterlarning optimal soni siluet mezonini asosida aniqlanib, so'ngra hosil bo'lgan bo'linish qo'llanilish mezonlariga muvofiqligi jihatidan tekshiriladi va har bir vaqt qatlamining parametrlari baholanadi.

2.3-paragrafda ishlab chiqilgan vaqt qatlami tushunchasi asosida chumolilar koloniyasining modifikatsiyalangan algoritmi – Time-Layer Adaptive Ant Colony Optimization (TLA-ACO) taklif etilgan. Bu algoritmi transport tarmog'ining ko'p qatlamli vaqt tuzilmasini to'g'ridan-to'g'ri yo'nalishlarni belgilash va feromon izlarini yangilash jarayonlariga birlashtiradi.

Graf $G = (V, A)$, vaqtinchalik qatlamlar $\{T_1, \dots, T_k\}$ va har bir qatlam uchun parametrlar Θ_k . Topilgan eng maqbul yo'nalish R^* va uning qiymati Z^* .

1-qadam. Har bir $k = 1, \dots, K$ qatlam uchun quyidagi formula bo'yicha $CV_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\bar{c}_{ij}}$

hisoblash lozim. Feromoni $\tau_{ij}^k \forall (i, j) \in E, \forall k$ quyidagi formula asosida

$\tau_{ij}^k(0) = \frac{1 + CV_k}{n}$ boshlang'ich qiymatini o'rnatish. Moslashuvchan $\alpha_k, \beta_k, \rho_k$

parametrlarni $\alpha_k = \alpha_0(1 - \gamma CV_k)$, $\beta_k = \beta_0(1 + \gamma \cdot CV_k)$ - $\rho_k = \rho_0(1 + \lambda CV_k)$

formulalar yordamida hisoblash. Parametrlarni belgilash: q_0 - aniq tanlov ehtimoli, ψ - o'tkazish koeffitsiyenti, θ - vaqt muvofiqligining jarima parametri.

2-qadam. Har bir chumoli uchun $m = 1, \dots, M$. Chumolini ombor (0-nuqta)ga joylashtirish, $t_0 :=$ marshrutning boshlanish vaqtini o'rnatish. Boshlang'ich k qatlamni shunday tanlash kerakki, $t_0 \in T_k$ bo'lsin. Tashrif buyurilgan M_m mijozlar to'plamini bo'sh deb hisoblash $V_m := \emptyset$.

Toki tashrif buyurilmagan mijozlar mavjud va sig'im tugamagan bo'lsa:

a) formula bo'yicha $p_{i,j}^{m,k}$ ehtimolliklarni hisoblash

$$p_{ij}^{m,k} = \frac{(\tau_{ij}^k)^{\alpha_k} (\eta_{ij}^k)^{\beta_k} \cdot \phi_{ij}^k}{\sum_{l \in N_i^m} (\tau_{il}^k)^{\alpha_k} (\eta_{il}^k)^{\beta_k} \cdot \phi_{il}^k} \text{ yoki } \tau_{ij}^k \leftarrow \tau_{ij}^k \left(1 - \xi \frac{L_k}{R_k}\right), (i, j) \in R \text{ formulasi bo'yicha.}$$

b) q_0 ehtimoli bilan eng katta qiymatga ega bo'lgan nuqtani tanlash, aks holda tasodifiy tarzda.

c) \hat{t}_j kutilayotgan vaqtni formula bo'yicha hisoblash $\hat{t}_j = t_i + s_i^k + \frac{d_{ij}}{v_{ij}^{(k)}}$.

d) Agar $\hat{t} \in T_{k'}, k' \neq k$ feromon transferi amalga oshirilsa $\tau_{ij}^{(k')} \leftarrow (1 - \psi) \tau_{ij}^{(k')} + \psi \cdot \mu_{kk'} \cdot \tau_{ij}^{(k)}$, $k := k'$ yangilanishi kerak.

e) Feromonning mahalliy yangilanishini bajarish $\tau_{ij}^k \leftarrow (1 - p_k) \tau_{ij}^k + \rho_k \tau_0^{(k)}$.

f) Yo'nalishga j nuqtani qo'shish, joriy t_j vaqtni yangilash. Chumolini omborga qaytarish, yo'nalishning umumiy Z_m qiymatini hisoblash. Har bir k qatlam uchun eng yaxshi L_k va eng yomon R_k yo'nalishlarni aniqlash.

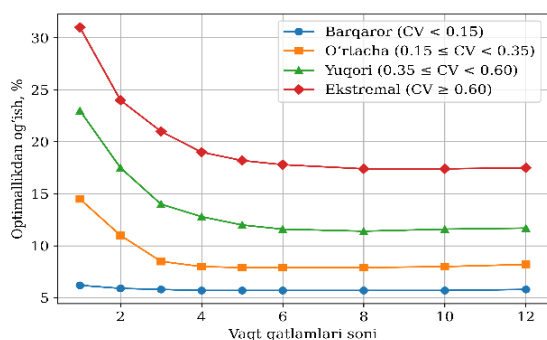
$\tau_{ij}^k \leftarrow (1 - p_k) \tau_{ij}^k + \Delta \tau_{ij}^k$ - $w_k = \frac{\Delta t_k}{T} (1 + CV_k)$ formula bo'yicha feromonning umumiy yangilanishini amalga oshirish. Agar $Z_m < Z^*$, bo'lsa, $R^* := R_m$, $Z^* := Z_m$ ni yangilash.

3-qadam. R^* va uning Z^* qiymatini qaytarish

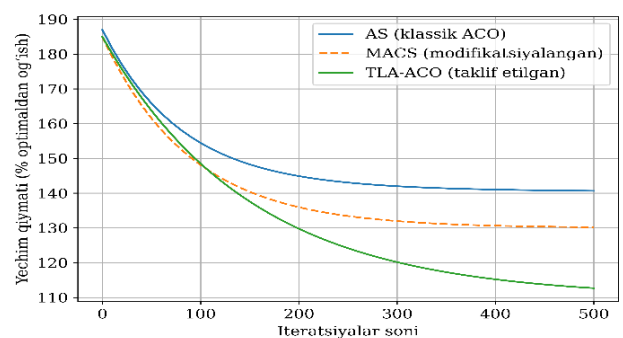
2.4-paragrafda ishlab chiqilgan TLA-ACO algoritmining samaradorligi transport tarmog'ining vaqt bo'yicha o'zgaruvchanligining turli darajalarida turli o'lchamdagi (20-500 mijoz) marshrutlash masalalari uchun o'tkazilgan hisoblash tajribalari orqali tasdiqlangan. Tajriba ssenariylari tarmoqlarni CV koeffitsiyenti bo'yicha tasniflash asosida ishlab chiqilgan.

Tajriba qismi TLA-ACO yechimlarining sifatini an'anaviy AS, takomillashtirilgan MACO va genetik algoritmlar bilan taqqoslashni o'z ichiga oladi.

Natijalar TLA-ACO ning eng katta afzalligi vaqt bo'yicha o'zgaruvchanligi yuqori bo'lgan tarmoqlarda namoyon bo'lishini ko'rsatadi. Vaqt qatlamlarining optimal soni (2-rasm) tarmoqning vaqt bo'yicha o'zgaruvchanlik darajasi bilan aniqlanishi va $\approx 2 + 15 \cdot CV$ empirik formulasi bilan baholanishi aniqlangan. Yaqinlashish tahlili (3-rasm) moslashuvchan parametrlar va qatlamlararo ma'lumot uzatish tufayli qidiruvning barqarorligi va erta to'xtab qolishning yo'qligini tasdiqladi.



2-rasm. Optimumning chetlanishi vaqt qatlamlari soniga bog'liqligi



3-rasm. Algoritmlarning konvergenstsiya dinamikasi

Yaqinlashish tahlili (3-rasm) qidiruvning muddatidan oldin turg'unlikka tushmasdan barqaror ishlashini tasdiqladi. Marshrutlar sifati barqaror tarmoqlar uchun 10–15% ga, yaqqol vaqtinchalik dinamikaga ega tarmoqlar uchun esa 40–50% gacha yaxshilandi. Haqiqiy ma'lumotlar asosida o'tkazilgan aprobatsiya yetkazib berish xarajatlari 19% gacha kamayganini va vaqt oraliq'i buzilishlari

qisqarganini ko‘rsatdi, bu esa taklif etilgan algoritmning amaliy ahamiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi.

Dissertatsiya ishining «**Transport marshrutlarini optimallashtirishga evolyutsion-gibrid yondashuv**» deb nomlangan uchinchi bobi marshrutlashni optimallashtirishga oid evolyutsion-gibrid yondashuvga bag‘ishlangan. U dissertatsiyada CVRPTW-LIFO (yuk ko‘tarish quvvati cheklangan, vaqt oralig‘i mavjud va «oxirgi yuklangan birinchi tushiriladi» texnologik qoidasiga asoslangan) deb belgilangan hamda NP-murakkab kombinatorik optimallashtirish masalalari sinfiga kiruvchi masalalar uchun matematik modelni tuzish va gibrid algoritmni ishlab chiqishni o‘z ichiga oladi.

Maqsad funksiyasi barcha avtomobillar va ularga belgilangan yo‘nalishlar bo‘yicha umumiy iqtisodiy va jarima ko‘rsatkichini minimallashtirish-ga qaratilgan bo‘lib, quyidagi ko‘rinishga ega:

$$F = \sum_{j \in V} \sum_{k \in R} y_{jk} (L(r_k)T(v_j) + p(r_k) + \alpha D_{jk} + \beta P_{jk}) \rightarrow \min, \quad (4)$$

bu yerda $(L(r_k) \cdot T(v_j))$ - yuklarni v_j transport vositasi (TV) yordamida r_k yo‘nalish bo‘ylab tashish xarajatlari; $p(r_k)$ - yo‘nalishdan foydalanishning bazaviy qiymati; D_{jk} - kechikish va vaqt oynalari buzilganligi uchun jarima funksiyasi; P_{jk} - texnologik buzilishlar (jumladan, LIFO) uchun umumiy jarima; α - ($\alpha \gg \beta$ tez ayniydigan yuklar uchun) D_{jk} jarima bo‘yicha vazn koeffitsiyenti; β - P_{jk} jarima bo‘yicha vazn koeffitsiyenti.

Cheklovlar tizimi, xususan, yuk ko‘tarish qobiliyati va sig‘im bo‘yicha cheklovlarni o‘z ichiga oladi:

$$Q_j^W \geq \sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot w_i, \quad Q_j^V \geq \sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot v_i, \quad \forall j \in V, \quad (5)$$

Shuningdek, yuklash/tushirish tartibini belgilaydigan cheklov (LIFO) quyidagi bog‘liqlikni o‘rnatadi:

$$t(r_k) + t_{ij} \leq d_i, \quad \forall i \in G, \forall r_k \in R, \quad (6)$$

bu yerda d_i - yukni yetkazib berishning maksimal vaqti (oxirgi muddat); $t(r_k)$ - marshrutni bosib o‘tish vaqti; $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ - yuklar to‘plami.

Yuklash va tushirish tartibiga oid cheklov: agar bo‘lsa, u holda yuk ayni bir transport vositasiga yuklangan yukdan keyin tushirilishi kerak:

$$o_{ij} > o_{il} \Rightarrow t_{ij} > t_{il}, \quad \forall j \in V, \forall i, l \in G, \quad (7)$$

Tahlillar shuni ko‘rsatdiki, LIFO cheklovlari va qat‘iy vaqt oraliqlari mavjud bo‘lgan sharoitda klassik marshrutlash usullari hamda chumoli to‘dasi algoritmlari (xususan, ACO) cheklangan samaradorlik namoyon etadi, bu esa o‘z navbatida gibrid evolyutsion usullarni qo‘llash zaruratini asoslaydi.

3.2-paragrafda differensial evolyutsiya (DE), genetik algoritm (GA) va o‘zgaruvchan qo‘shnichilik usuli (VNS) asosidagi mahalliy qidiruvni o‘zida mujassamlashtirgan gibrid evolyutsion algoritm taklif etilgan.

Yechimlarni kodlash uchun marshrut ajratgichlari bo‘lgan marshrut xromosoma-o‘rin almashtirishlaridan foydalaniladi:

$$\pi = \langle 0, \pi_1, \dots, \pi_{k_1}, 0, \pi_{k_1+1}, \dots, \pi_{k_1+k_2}, 0, \dots \rangle, \quad (8)$$

bu esa yo‘nalishlar tuzilishini saqlab qolgan holda qayta birlashish operatorlarini qo‘llash imkonini beradi. Individdning sifatini baholash jarima ballarini inobatga olgan holda maqsadli funksiya orqali ifodalanadi:

$$F(\pi) = \sum_{j \in V} \sum_{k \in R} y_{jk}(\pi) [L(r_k)T(v_j) + p(r_k) + \alpha D_{jk}(\pi) + \beta P_{jk}(\pi)] \rightarrow \min, \quad (9)$$

Kechikish uchun jarima quyidagicha aniqlanadi:

$$D_{jk} = \sum_{i \in r_k} \max(0, t_{ij} - T_{i \max}), \quad (10)$$

bu yerda t_{ij} – i mijozning oldiga yetib borishning haqiqiy vaqti; i – yuk arizasi/partiyasi (buyurtma, mijoz) indeksi, ya’ni alohida tashish birligi; agar yetkazib berish o‘z vaqtida amalga oshirilsa, jarima nolga teng bo‘ladi. $T_{i \max}$ mijoz belgilagan oxirgi muddat; ya’ni, agar $t_i \leq T_{i \max}$ bo‘lsa, jarima qo‘llanilmaydi va nolga teng bo‘ladi.

Sig‘im cheklovlarini va LIFO yuklash/tushirish tamoyilini buzganlik uchun jarima quyidagi miqdorda hisoblanadi:

$$P_{jk} = \gamma_1 \cdot \max\left(0, \sum_i w_i - W_j\right) + \gamma_2 \cdot \max\left(0, \sum_i v_i - V_j\right) + \gamma_3 \cdot H_{jk}, \quad (11)$$

bunda $H_{jk} \in \{0,1\}$ LIFO buzilishi holatini qayd etadi.

DE-GA+VNS gibrid evolyutsion algoritmi iterativ tarzda ishlaydi. Har bir avlod quyidagi bosqichlardan ketma-ket o‘tadi:

1-qadam. DE-mutatsiya. Joriy individ uchun $m_i = x_{r_1} + \mu(x_{r_2} - x_{r_3})$ mutatsiya vektori hosil qilinadi, bu yerda μ mutatsiya koeffitsienti hisoblanadi. U yechimlar fazosini samarali global tadqiq qilishni ta’minlaydi va DE algoritmining asosiy mexanizmi sanaladi.

2-qadam. DE-krossover. Maqsadli individ va mutant o‘rtasida sinovchi individni shakllantiruvchi binar DE-krossover amalga oshiriladi

$$u_{i,j} = \begin{cases} m_{i,j}, & \text{agar } d_j < CR \\ x_{i,j} & \text{aks holda} \end{cases},$$

3-qadam. Marshrutlarning GA-krossoveri (elita chatishtiruvchi). Muvaffaqiyatli qism-marshrutlarni rekombinatsiya qilish uchun joriy populyatsiyadagi eng yaxshi individlarga nisbatan ehtimollik bilan qo‘llanadi.

4-qadam. GA-mutatsiya. Populyatsiya xilma-xilligini saqlash uchun $p_m = 0.05$ ehtimollik bilan kichik tasodifiy o‘zgarishlar kiritiladi.

5-qadam. PSO (Particle Swarm Optimization) - pozitsiyalarni yangilash:

$$\mathbf{v}_i = \omega \mathbf{v}_i + \phi_1 r_1 (\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_i) + \phi_2 r_2 (\mathbf{g} - \mathbf{x}_i); \mathbf{x}_i \leftarrow \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i,$$

bunda \mathbf{x}_i va \mathbf{v}_i – zarraning pozitsiya va tezlik vektorlari; \mathbf{p}_i - zarraning eng yaxshi lokal yo‘nalishi; \mathbf{g} – to‘daning eng yaxshi global yo‘nalishi; ω – inersiya koeffitsiyenti [0.4; 0.9]; ϕ_1, ϕ_2 – shaxsiy va jamoaviy tajriba vazn koeffitsiyentlari; $r_1, r_2 \sim U(0,1)$ – qidiruvga stoxastik element kirituvchi tasodifiy sonlar.

6-qadam. Lokal qidiruv (LS). VNS-takomillashtirish. Jarimalarni sezilarli darajada kamaytirish va bartaraf etish maqsadida 2-opt, relocate, swap operatorlari yordamida yo‘nalishlarni qo‘shimcha intensiv qayta ishlash.

7-qadam. Elita seleksiyasi. Eng yaxshi N nusxalarni $\mathbf{P}_{t+1} = B_N(\mathbf{P}_t \cup \mathbf{U}_t)$ saqlash. Keyingi avlod uchun $N=80$ ta eng yaxshi individ tanlanadi va ular keyingi populyatsiyaning asosini tashkil etadi.

PSO-bosqichi ixtiyoriy bo'lib, pozitsiyalarni qo'shimcha yaxshilashni ta'minlaydi va usiz ham algoritm o'z ish qobiliyatini saqlab qoladi.

§ 3.3-paragrafda lokal optimallashtirish mexanizmi sifatida o'zgaruvchan qo'shnilik usuli (VNS) qo'llaniladi.

Lokal qidiruv (VNS) 2-opt, relocate, swap kabi bazaviy operatorlar yordamida, jumladan, marshrutlar o'rtasidagi almashinuvni hisobga olgan holda amalga oshiriladi va yechimni yaxshilashni qabul qilish sharti bilan rasmiylashtiriladi:

$$\pi' = \arg \min_{\sigma \in N_k(\pi)} F(\sigma), \text{ agar } F(\pi') < F(\pi), \text{ unda } \pi \leftarrow \pi', \quad (12)$$

yoki mantiqiy shart ko'rinishida:

$$\exists k \in \{1, 2, 3\}: \min_{\sigma \in N_k(\pi)} F(\sigma) < F(\pi) \Rightarrow \pi \leftarrow \arg \min_{\sigma \in N_k(\pi)} F(\sigma), \quad (13)$$

Iteratsiyalarning to'xtash holatini ifodalash maqsadida (3.9) tenglamani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$\forall k \in \{1, 2, 3\} \Rightarrow \min_{\sigma \in N_k(\pi)} F(\sigma) \geq F(\pi) \Rightarrow \text{keyingi bosqichga o'tish}. \quad (14)$$

VNS-komponent lokal minimumlarda tiqilib qolish xavfini kamaytiradi va yechimlar sifati takrorlanuvchanligini oshiradi. Yaxshilanish topilganda u asosiy atroflikka qaytadi, bu esa yaqinlashishning barqarorligini oshiradi.

§ 3.4-paragrafda barqarorlikni oshirish hamda parametrlarni sozlashga nisbatan sezgirlikni kamaytirish uchun SaDE o'z-o'zini moslashtirish mexanizmi gibrid algoritmgga integratsiya qilingan. Mutatsiya va crossover parametrlari avvalgi iteratsiyalarning muvaffaqiyatiga asoslanib, avtomatik tarzda sozlanadi, bu esa ularni qo'lda sozlash zaruratini kamaytiradi.

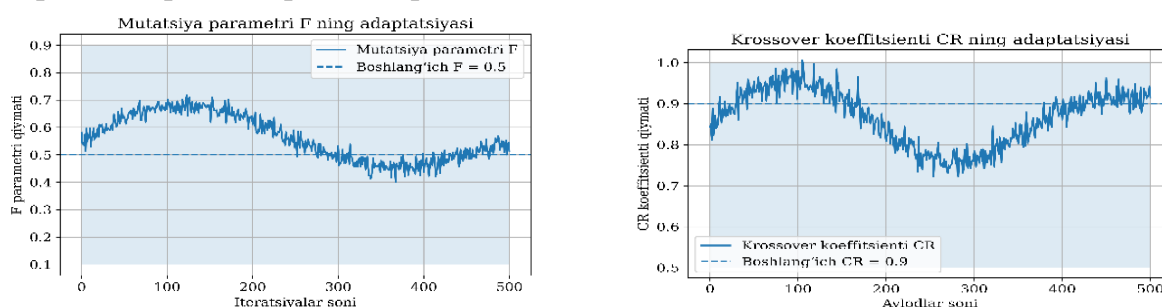
Krossover parametri uchun $\mu_{CR}^k \leftarrow (1-c) \cdot \mu_{CR}^k + c \overline{CR}_s$ o'rtacha qiymatni yangilash sxemasi keltiriladi va muvaffaqiyatlilik quyidagicha baholanadi:

$$SR(\mu_i, CR_i) = \frac{N_s(\mu_i, CR_i)}{N_i(\mu_i, CR_i)}. \quad (15)$$

Parametrlarni yangilash quyidagi qoidalar bo'yicha amalga oshiriladi:

$$F_n = F_s + \alpha \cdot (SR_F - 0.5), CR_n = CR_s + \beta \cdot (SR_{CR} - 0.5), \quad (16)$$

bunda α va β - moslashuv tezligi koeffitsiyentlari ($\alpha = 0.1, \beta = 0.1$). 4-rasmda F va CR parametrlarining moslashuv grafiklari keltirilgan. Parametrlar $F \in [0.1, 0.9]$, $CR \in [0.5, 1.0]$ ushbu belgilangan oraliqlar doirasida cheklanadi.



4-rasm. Evolyutsiya jarayonida F va CR parametrlarining moslashuvi

Yechimlarning barqarorligi variatsiya koeffitsiyenti bilan baholanadi va oxirgi 20 ta avlod davomidagi sifatning nisbiy o‘shishiga ko‘ra amaliy to‘xtatish mezonlari joriy etiladi:

$$CV = \left(\frac{\sigma_F}{\mu_F} \right) \times 100\%, \quad \varepsilon = \frac{F_b(t-20) - F_b(t)}{F_b(t)} < 10^{-4}, \quad (17)$$

bu turg‘unlik va evolyutsion siklni yakunlash uchun asos deb talqin qilinadi.

§ 3.5-paragrafda qat’iy cheklolarga ega transport vositalarini marshrutlash masalalarini yechish uchun SaDE mexanizmlili DE-GA+LS o‘z-o‘zini moslashtiruvchi gibridd evolyutsion algoritmi ishlab chiqilgan.

DE-GA+VNS gibriddini Solomonning modifikatsiyalangan to‘plamlarida (S-50, M-100, L-200) eksperimental sinovdan o‘tkazish yechim qiymati bo‘yicha sezilarli ustunlikni namoyon etadi (2-jadval).

2-jadval

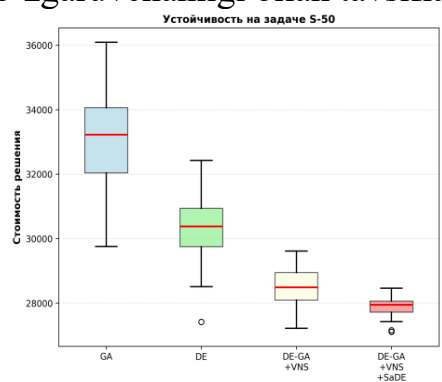
Hisoblash eksperimentlari natijalari

Algoritm	S-50 F	Δ %	t (s)	σ	M-100 F	Δ %	t (s)	σ	L-200 F	Δ %	t(s)	σ
GA	32 850	+14.6	92	830	66 210	+17.4	196	1 490	134 700	+18.5	438	2 370
DE	30 740	+7.3	104	540	61 890	+9.4	210	1 120	123 600	+10.4	462	1 750
DE-GA-VNS	27 930	0.0	118	380	56 780	0.0	244	690	110 820	0.0	529	1 090

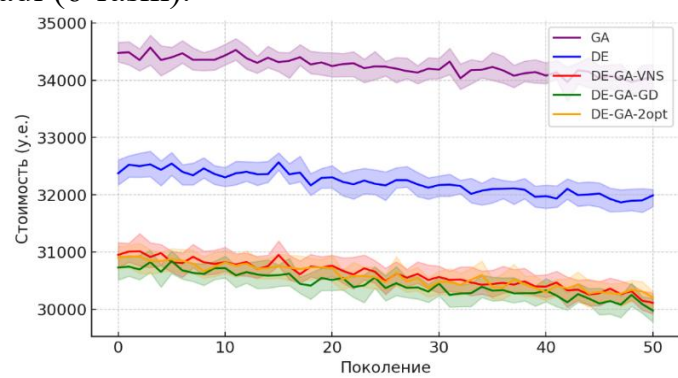
O‘tkazilgan hisoblash tajribalari buyurtmalar soni 200 tagacha bo‘lganda xarajatlar klassik GAga nisbatan 8–12 foizga, DEga nisbatan esa 5–9 foizga kamayganini ko‘rsatdi. DE-GA-VNSdan tashqari, ikkita soddalashtirilgan gibridd variant: rangli gradient tushishiga asoslangan DE-GA-GD modeli va DE-GA-2opt varianti ham sinovdan o‘tkazildi.

Barqarorlikning statistik tahlili shuni ko‘rsatdiki, SaDE algoritmidan foydalanish yechimlar o‘zgaruvchanligini 1,4 foizgacha kamaytirish imkonini beradi, bu esa GA va DENing asosiy versiyalaridan ancha ustun ekanligini anglatadi.

Algoritm umumiy xarajatlarni bazaviy GA va DE algoritmlariga nisbatan 14–18% ga kamaytirishni ta‘minlaydi hamda natijalarning $CV \approx 1-2\%$ kabi past o‘zgaruvchanligi bilan tavsiflanadi (6-rasm).



5-rasm. Algoritm barqarorligini tahlil qilish



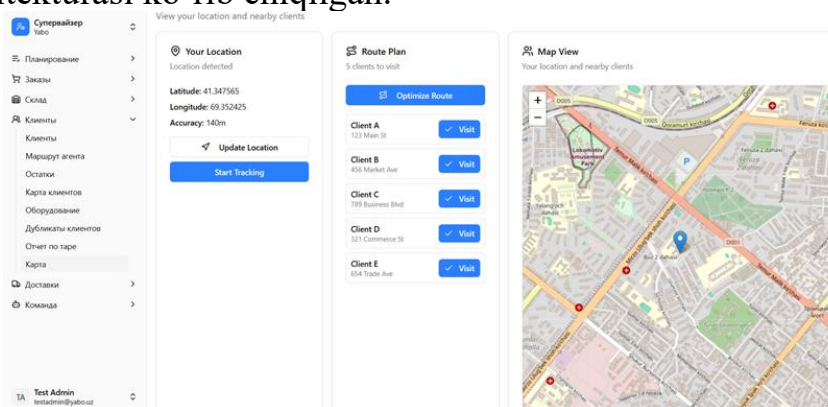
6-rasm. Barcha algoritmlar va uchala o‘lchamdagi masalalar uchun yechimlar qiymatining egri chiziqlari

Mahalliy qidiruv variantlari orasida DE-GA-VNS eng yuqori sifatni ta‘minlaydi, DE-GA-2opt sifati $\leq 1,5\%$ ga yomonlashganda 25% tezroq, DE-GA-

GD esa ~0,8% lik yo‘qotishlarda 10% tezroq ishlaydi. Bu uning samaradorligini va transport logistikasi AATda amaliy qo‘llash mumkinligini tasdiqlaydi.

Dissertatsiya ishining **“Ishlab chiqilgan modellar va algoritmlarni dasturiy amalga oshirish hamda eksperimental tadqiq etish”** nomli to‘rtinchi bobi dasturiy vositani yaratishga hamda uni test va real ma’lumotlarda eksperimental tekshirishga bag‘ishlangan.

§4.1 da qishloq xo‘jaligi mahsulotlarini tashishni boshqarishning to‘liq siklini - ma’lumotlarni integratsiyalash va yo‘nalishlarni rejalashtirishdan tortib, samaradorlikni monitoring qilish hamda tahlil etishgacha bo‘lgan jarayonlarni qo‘llab-quvvatlashga mo‘ljallangan transport logistikasi axborot tizimining uch bosqichli arxitekturasi ko‘rib chiqilgan.



7-rasm. Agent xaritasi va yo‘nalishi oynasi

Arxitektura quyidagi tamoyil asosida qurilgan: axborot darajasi ma’lumotlar integratsiyasi va saqlanishini ta’minlaydi, algoritmik daraja esa SaDE mexanizmi va LIFO nazorati bilan birga vaqt qatlamlari, TLA-ACO hamda gibrid DE–GA+VNS modellarini tatbiq etadi; boshqaruv darajasi sozlash, optimallashtirishni ishga tushirish va natijalarni vizuallashtirishga mas’uldir. Tizim korxonaning IT-infratuzilmasiga miqyoslanuvchanlik va integratsiyalashuvni ta’minlovchi veb-yo‘naltirilgan dasturiy majmua (7-rasm) sifatida ishlab chiqilgan.

§4.2 paragrafda ishlab chiqilgan algoritmlarning to‘g‘riligi va samaradorligini baholash uchun CVRPTW-LIFO qo‘yilishiga moslashtirilgan Solomon (R, C, RC) standart test to‘plamlarida hisoblash tajribalari o‘tkazildi. Taqqoslash GA va DE bazaviy algoritmlari bilan amalga oshirildi.

3-jadval

Solomon testlarida algoritmlarni taqqoslash(o‘rtacha qiymatlar)

To‘plam	GA	DE	DE-GA+VNS	Δ GA (%)	Δ dan DE (%)
R101-R112 (12 ta vazifa)	1828.4.	1756,8	1642.3.	-10.2%	-6,5%
C101-C109 (9 ta vazifa)	952.6.	905.4	841.2	-11,7%	-7,1%
RC101-RC108 (8 ta vazifa)	1624.7	1568,3	1482,9	-8,7%	-5,4%
O‘rtacha yaxshilanish	-	-	-	-10.2%	-6,3%

DE-GA+VNS algoritmi maqsadli funksiyani GAgga nisbatan 10,2% ga, DEga nisbatan esa 6,3% ga yaxshilaydi. Bu eng katta samaradorlikni klasterli masalalarda ko'rsatib, murakkab cheklovlarga ega marshrutlash uchun gibrid yondashuvning afzalligini tasdiqlaydi.

§4.3 da ishlab chiqilgan dasturiy majmuani O'zbekistonning uchta logistik korxonasi (ichimliklar tarqatish, paxta xom ashyosi va tez buziladigan mahsulotlarni tashish) ma'lumotlarida amaliy qo'llash mumkinligi tajribada tasdiqlangan. Eng keng ko'lamli sinovlar (200 ta buyurtma, 25 ta TS) LIFO buzilishlarini bartaraf etish va rejalashtirish vaqtini 180 daqiqadan 15 daqiqagacha qisqartirish bilan umumiy masofani 13,8% ga, yo'ldagi vaqtni 11,5% ga, yoqilg'i sarfini 13,8% ga, TS sonini 12% ga kamaytirishni ko'rsatdi; iqtisodiy samaradorlik yiliga 401,3 mln so'mni tashkil etdi. Uchta obyekt bo'yicha umumiy samara yiliga 884,6 million so'mga yetdi, o'rtacha ROI esa taxminan 340% ni tashkil etdi.

§4.4-da LIFO turidagi xizmat ko'rsatish ketma-ketligi cheklovlarini hisobga olish marshrutlar uzunligining biroz ortishiga (o'rtacha 2-4% ga) olib kelishi, biroq texnologik buzilishlarni va ular bilan bog'liq qo'shimcha xarajatlarni butunlay bartaraf etishi aniqlangan.

4-jadval

Natijalarni statistik tasdiqlash

Test / Metrika	Coca-Cola (200 zak.)	Paxta (180 zak.)	Samarqand logistika
Juft t-test, p	p<0,001.	p<0,001.	p<0,01.
Vilkokson testi, p	p<0,01.	p<0,01.	p<0,01.
d Koen	2,83	2,83	2,15
CV variatsiya koeffitsiyenti, %	1,4%	1,4%	2,1%
Ishga tushirishlar soni	30	30	30

Statistik tekshiruv (juftli t-mezon, Vilkokson mezoni, 4-jadval) natijalarning $p<0,01$ darajasidagi ahamiyatligini tasdiqladi. 30 ta mustaqil ishga tushirishda variatsiya koeffitsiyenti 1,4–2,1% ni tashkil etdi, bu esa algoritmnining yuqori darajada takrorlanuvchanligini ko'rsatadi. Solomon benmarklari va real ma'lumotlar asosida o'tkazilgan sinovlar algoritmnining har ikki holatda ham barqaror ishlashini namoyon etdi.

XULOSA

1. Yuk tashishni boshqarish axborot tizimining o'zaro bog'liq ikki quyi tizimdan (yuk tashishni boshqarish va axborot oqimlarini boshqarish) iborat arxitekturasi ishlab chiqildi.

2. Transport tarmoqlarida harakat jadalligining sutkalik, haftalik va mavsumiy tebranishlarini hisobga olishga mo'ljallangan modelning vaqtinchalik qatlami konsepsiyasi yaratildi. Bu konsepsiya dinamik o'zgaruvchan parametrlar sharoitida yo'nalishlarni rejalashtirish aniqligini oshirish imkonini beradi.

3. Yuk ko'tarish quvvati cheklangan transport marshrutlash masalasini yechish uchun chumolilar koloniyasining modifikatsiyalangan algoritmi ishlab chiqildi. Ushbu algoritm eng yaxshi va eng yomon yo'nalishlarni inobatga olgan holda

mijozlarni tanlash ehtimolligini taqsimlashning yangi formulasiga asoslangan bo'lib, yechimlar sifatini 8-12 foizga yaxshilashni ta'minlaydi.

4. "Aniq vaqtda" yetkazib berish tushunchasini hisobga olgan holda qishloq xo'jaligi logistikasining o'ziga xos xususiyatlariga moslashtirilgan cheklangan yuk ko'tarish qobiliyati, vaqt oraliqlari va LIFO cheklovlari (CVRPTW-LIFO) bilan marshrutlash masalasining matematik modeli ishlab chiqildi.

5. Differensial evolyutsiya, genetik algoritmlar va o'zgaruvchan qo'shnilikdagi mahalliy qidiruvni birlashtirgan, optimallashtirish jarayonining turg'unligiga qarab turli mahalliy qidiruv strategiyalari (VNS, gradiyent tushish, 2-opt) o'rtasida o'tish mexanizmiga ega bo'lgan DE-GA+VNS gibrid evolyutsion algoritmi ishlab chiqildi.

6. SaDE (O'z-o'zini moslashtiruvchi differensial evolyutsiya) mexanizmi orqali evolyutsion algoritmlarning boshqaruv parametrlari (mutatsiya koeffitsiyenti va chatishish ehtimolligi CR) ning tarixiy samaradorligini tahlil qilish asosida ularning o'z-o'zini moslashtirish metodikasi taklif etildi.

7. Yechim sifati va hisoblash xarajatlari o'rtasidagi muvozanatni ta'minlaydigan yechim qiymatining nisbiy o'zgarishiga (30 iteratsiya davomida 0,1% dan kam) asoslangan evolyutsion qidiruvni to'xtatishning kompleks mezonini ishlab chiqildi.

8. Real vaqt rejimida mahsulot partiyalari, transport vositalarining holati va tartibga solish cheklovlari haqidagi turli xil ma'lumotlarni qayta ishlashni ta'minlovchi transport logistikasi axborot tizimlariga evolyutsion algoritmlarni integratsiyalash metodologiyasi taklif etildi.

9. Ishlab chiqilgan axborot tizimi va optimallashtirish algoritmlarini joriy etish rejalashtirishning asosiy evristik usullariga nisbatan umumiy logistika xarajatlarini 8-12% ga kamaytirishga olib keldi. Marshrutlarning umumiy uzunligi 5-9% ga qisqardi, bu yoqilg'i-moylash materiallari sarfini kamaytirish va transport operatsiyalarining atrof-muhitga ta'sirini pasaytirishni ta'minladi. Transport parkidan foydalanish samaradorligini oshirish tashish hajmini saqlab qolgan holda jalb etilgan transport vositalari sonini 10-15% ga qisqartirish imkonini berdi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ
ИНСТИТУТЕ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

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

АХМЕДЖАНОВА ЗАРРИНА ИСКАНДАРОВНА

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДАННЫХ
ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ
НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННО ГИБРИДНОГО ПОИСКА**

05.01.03 – Теоретические основы информатики

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

Ташкент – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2025.2.PhD/T5624.

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Автореферат диссертации размещён на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) на сайте Научного совета (www.airi.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziynet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель:	Сулюкова Лариса Фаритовна доктор технических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты:	Ташев Азат Арипович (Казахстан) доктор технических наук, профессор Мухамедиева Дилноз Тулкуновна доктор технических наук, профессор
Ведущая организация:	Ташкентский государственный транспортный университет

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2026 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M при Научно-исследовательском институте развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо Улугбекский р-н, Буз-2, 17А Тел.: (+99871) 263-41-98; e-mail: info@airi.uz)

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

Автореферат диссертации разослан « _____ » _____ 2026 года.
(реестр протокола рассылки № _____ от « _____ » _____ 2026 года)

Н. Равшанов

Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор

Ф.М. Нуралиев

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор

Н. Мирзаев

Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире в условиях цифровой трансформации экономики и активного внедрения интеллектуальных информационных технологий существенно возрастает роль информационных систем в управлении транспортно-логистическими процессами. Современные информационные системы транспортной логистики функционируют в условиях обработки больших объёмов разнородных и динамически изменяющихся данных, характеризующихся высокой степенью неопределённости и сложной структурой взаимодействия. Это требует разработки новых теоретически обоснованных моделей и алгоритмов взаимодействия данных, обеспечивающих эффективность принятия решений и устойчивость функционирования систем.

В мире ведутся исследования для направленные на совершенствование методов решения задач транспортной логистики с использованием эволюционных вычислений и гибридных алгоритмов. Особенно активно данные исследования проводятся в США, Китае, странах Европейского Союза (Германия, Франция, Нидерланды), Японии и Южной Кореи. Ведущие научные центры и университеты этих стран разрабатывают инновационные подходы к решению задач маршрутизации. Крупные логистические компании и корпорации, включая DHL, FedEx, UPS, Amazon Logistics, активно внедряют интеллектуальные системы оптимизации маршрутов, использующие генетические, муравьиные алгоритмы и другие метаэвристики. Оптимизация грузоперевозок, требующей своевременной доставки в условиях ограничений становится критически важной задачей. В этой связи разработка и совершенствование математических моделей, методов и алгоритмов оптимизации маршрутизации транспортных средств является одним из приоритетных направлений исследований.

В Республике Узбекистан уделяется особое внимание развитию транспортно-логистической инфраструктуры и внедрению информационных технологий для управления грузоперевозками. В Указе Президента Республики Узбекистан «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»² особое внимание уделяется цифровизации отраслей экономики, внедрению интеллектуальных информационных систем и развитию транспортной инфраструктуры на основе современных информационно-коммуникационных технологий. Подчёркивается необходимость повышения эффективности управления транспортными и логистическими процессами, автоматизации принятия решений и внедрения цифровых платформ. В постановлении Президента № ПП-28 от 27.01.2025, «О мерах по дальнейшему развитию транспортно-логистической системы Республики Узбекистан», определены задачи по необходимости разработки интеллектуальных систем управления транспортом. Выполнение указанных задач предполагает

² Указ Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 – 2026 годы

разработку математических моделей задач маршрутизации, учитывающих специфику грузоперевозок, создание эффективных эволюционных алгоритмов оптимизации, а также разработку и внедрение в практику информационных систем транспортной логистики, обеспечивающих планирование маршрутов и оперативное управление перевозками.

Результаты, данного диссертационного исследования, в определенной мере служат выполнению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан от 21.10.2020 года № УП-6091 «О мерах по дальнейшему расширению финансовой поддержки экспортной деятельности», № УП-6079 от 05.10.2020 г. «Об утверждении Стратегии "Цифровой Узбекистан - 2030" и мерах по ее эффективной реализации, № УП-6042 от 18.08.2020 г. «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию экспортного и инвестиционного потенциала республики», № УП-60 от 28.01.2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», постановлением № ПП-28 от 27.01.2025, «О мерах по дальнейшему развитию транспортно-логистической системы Республики Узбекистан» и другими нормативно-правовыми документами, принятыми в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий IV “Развитие информатизации и информационно-коммуникационных технологий”.

Степень изученности проблемы. Теоретическим основам задач комбинаторной оптимизации и интеллектуальной маршрутизации посвящено значительное число работ зарубежных учёных, таких как G. B. Dantzig и J. H. Ramser, P. Toth и D. Vigo, G. Laporte, J.-F. Cordeau, T. Crainic и M. Gendreau. Эволюционные алгоритмы оптимизации активно разрабатываются научными школами под руководством D.E. Goldberg, Z. Michalewicz, K. Deb, а в области гибридных метаэвристик — С. Blum, M. Dorigo, T. Stützle. В трудах Г.И. Браверман, Ю. Г. Евтушенко, В. Г. Хачатрян, А. А. Лапина рассматриваются вопросы разработки эвристических и гибридных методов, а также их применения в системах поддержки принятия решений.

В Республике Узбекистан, значительный вклад в развитие теоретических и практических подходов к решению задач комбинаторной оптимизации, в развитие теоретических основ анализа данных и алгоритмизации внесли ученые Ш.Х. Фозилов, Н.С. Маматов, Н.М. Мирзаев, С.С. Раджабов, Д.Т. Мухамедиева, Л.Ф. Сулюкова, Ж.Р. Абдуразаков. Вместе с тем, недостаточно изученными остаются вопросы разработки специализированных моделей для задач взаимодействия данных с ограничениями, интеграции разработанных моделей и алгоритмов в информационные системы.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ Научно-исследовательского института развития цифровых технологий и искусственного интеллекта и Самаркандского филиала Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий в

рамках проектов: № А-ОТ-2021-108 «Разработка информационно-аналитических методов мониторинга, прогнозирования и поддержки принятия решений в распределённых системах» (2021–2023 гг.), № Б-2023-27 «Цифровое проектирование процессов механической обработки деталей высокой точности» (2023–2024 гг.).

Целью исследования является разработка моделей и алгоритмов решения задач транспортной маршрутизации на основе эволюционного гибридного подхода с механизмами самоадаптации.

Задачи исследования:

провести анализ информационных систем транспортной логистики, классификации задач маршрутизации и методов их решения;

разработать концепцию временного слоя для модели задачи транспортной маршрутизации;

усовершенствовать алгоритм для задачи маршрутизации с комплексными ограничениями;

разработать математическую модель задачи маршрутизации транспортных средств с ограниченной грузоподъемностью, временными окнами и ограничениями последовательности загрузки/разгрузки;

на основе локального улучшения со строгим комплексным критерием остановки эволюционного поиска разработать гибридный алгоритм;

провести экспериментальные исследования разработанных моделей и алгоритмов на стандартных тестовых наборах и реальных данных и разработать программный комплекс, обеспечивающий полный цикл логистического планирования.

Объектом исследования являются задачи комбинаторной оптимизации маршрутизации транспорта.

Предметом исследования составляют математические модели, эволюционные гибридные алгоритмы, методы самоадаптации и взаимодействия данных в информационных системах для решения задач комбинаторной оптимизации маршрутизации транспортных средств.

Методы исследования. В ходе работы применялись методы теоретической информатики и теории алгоритмов, математического моделирования и комбинаторной оптимизации, методы эволюционных вычислений и локального поиска, а также теории вероятностей и объектно-ориентированного программирования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

на основе моделирования динамических изменений параметров транспортной сети разработана концепция временного слоя;

разработан модифицированный алгоритм муравьиных колоний с учётом временных слоёв, обеспечивающий улучшение качества решений при сохранении временной сложности;

с учётом принципа LIFO разработана математическая модель задачи маршрутизации транспортных средств с комплексными ограничениями, адаптированная для специфики сельскохозяйственной логистики;

на основе дифференциальной эволюции, генетического алгоритма и локального поиска с механизмом самоадаптации параметров разработан гибридный эволюционный алгоритм.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработано алгоритмическое и программное обеспечение информационной системы транспортной логистики, включающее модифицированный алгоритм муравьиных колоний и гибридный эволюционный алгоритм с самоадаптацией параметров для решения сложных задач маршрутизации, реализованные в рамках трёхуровневой архитектуры и обеспечивающие среднее отклонение от лучших известных решений не более 0,9%; внедрение полученных результатов подтвердило сокращение транспортных затрат на 14,3%, уменьшение потребности в транспортных средствах до 17% и снижение времени планирования при полном устранении нарушений ограничений последовательности обслуживания.

Достоверность результатов исследования обеспечивается корректностью математических моделей, строгой формализацией задач и алгоритмов, применением методов комбинаторной оптимизации, подтверждается вычислительными экспериментами на тестовых данных, сопоставлением с известными методами и воспроизводимостью результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость заключается в разработке моделей взаимодействия данных информационной системы транспортной логистики и эволюционного гибридного алгоритма их обработки и оптимизации. Предложена модифицированная формула распределения вероятностей в алгоритме муравьиных колоний, учитывающая не только лучшие, но и худшие решения, что предотвращает преждевременную сходимость. Теоретически обоснована эффективность адаптивного гибридного алгоритма, интегрирующего дифференциальную эволюцию, генетические операторы и локальный поиск с механизмами самоадаптации параметров.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения разработанных моделей и алгоритмов при создании информационных систем транспортной логистики, систем поддержки принятия решений и интеллектуальных транспортных систем. Предложенные алгоритмические решения могут быть использованы для повышения эффективности планирования маршрутов, сокращения эксплуатационных затрат и улучшения качества управления логистическими процессами.

Внедрение результатов исследования. На основе разработанных математических моделей задач маршрутизации с ограничениями и алгоритмов эволюционного гибридного поиска:

информационная система управления грузоперевозками внедрена в практическую деятельность ООО «Samarkand Logistics» (справка Хокимията Самаркандской области РУз от 1 декабря 2025 года № 02-02/8133). В результате позволило снизить логистические издержки на 8–12%, ускорить формирование маршрутов на 5–7% и сократить количество транспорта на 10–15% при сохранении объёма перевозок;

программный комплекс оптимизации маршрутов с учетом комплексных ограничений грузоподъемности, временными окнами и последовательностью операций по принципу LIFO, внедрён в ООО «Coca-Cola Ichimligi Uzbekistan LTD» (справка Хокимията Самаркандской области РУз от 1.01.2025 года № 02-02/8133), обеспечив автоматическую обработку до 200 заказов при использовании парка до 25 транспортных средств, снижение логистических затрат, обеспечить интеграцию с ERP-системой и стабильность решений с коэффициентом вариации 1,4%;

программный комплекс, созданный на основе адаптивного гибридного эволюционного алгоритма с механизмами самоадаптации параметров и автоматического выбора стратегий поиска, внедрён в практическую деятельность ООО «Marokand Khumo Services» (справка Хокимията Самаркандской области РУз от 1.01.2025 года № 02-02/8133), что позволило ускорить формирование маршрутов и распределение заказов на 5–7% и обеспечить эффективную координацию подразделений.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 7 международных и 3 республиканских научных конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из которых 7 статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций, в том числе 3 в зарубежных (2 из которых индексируются в базе Scopus), и 5 в республиканских журналах, а также получены 2 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, приводится соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики, изложены научная новизна, практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрывается теоретическая и практическая значимость результатов исследования, приведены сведения о внедрении результатов исследования, об опубликованности результатов и структуре диссертации.

Первая глава диссертации «**Анализ информационных систем и алгоритмов обработки данных**» посвящена исследованию теоретических и прикладных аспектов задач маршрутизации транспортных средств, а также анализу проблем взаимодействия данных информационных систем (ИС) транспортной логистики. В главе рассмотрены основные классы задач маршрутизации транспортных средств (VRP) и их расширения. Показано, что задачи семейства VRP составляют основу систем управления перевозками,

однако отличаются высокой комбинаторной сложностью из-за множества разнородных ограничений. Базовые модели (CVRP, VRPTW, MDVRP) широко применяются на практике, но не обеспечивают полноценного учёта специфики сельскохозяйственных перевозок – сезонности, скоропортящегося характера продукции, территориальной распределённости и жёстких временных окон обслуживания. Анализ существующих информационных систем показал, что большинство из них ориентировано на статические постановки задач и использует закрытые или слабо адаптируемые алгоритмы, что ограничивает их применение в условиях высокой размерности и динамичности, а также затрудняет интеграцию новых алгоритмических подходов. Проанализированы методы решения задач оптимизации в транспортной логистике, включая точные, эвристические, метаэвристические и гибридные подходы.

В таблице 1 представлена зависимость отклонения найденных решений от оптимального значения для различных алгоритмов маршрутизации при росте размерности задачи.

Таблица 1

Отклонение от оптимального решения (%)

Число узлов	GA	DE	ACO	LS
2	0,2	0,3	0,5	0,4
10	1,5	1,8	2,5	2,1
50	4,2	4,8	5,8	5,2
100	5,5	6,2	7,5	6,8

Анализ результатов подтверждает, что генетические алгоритмы обеспечивают более низкое среднее отклонение по сравнению с дифференциальной эволюцией, муравьиными алгоритмами и методами локального поиска при росте размерности задачи.

На рис. 1 иллюстрируется многокритериальное сравнение алгоритмов оптимизации маршрутизации генетических (GA), дифференциальная эволюция (DE), классический алгоритм муравьиных колоний (ACO) и локального поиска (LS) по показателям вычислительной сложности, точности решений, адаптивности и скорости сходимости.

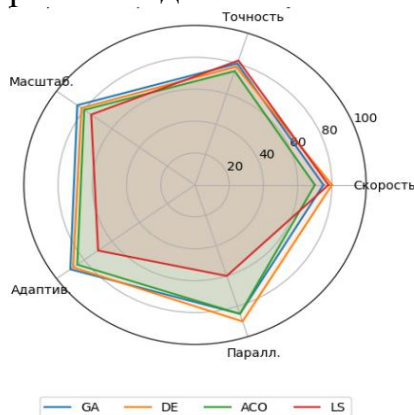


Рис. 1. Многокритериальное сравнение

Диаграмма показывает, что эволюционные алгоритмы обеспечивают сбалансированное соотношение между качеством решений и

вычислительными затратами, что подтверждает целесообразность их использования в составе гибридных методов. Выявлено, что точные методы неприменимы для задач реальной размерности из-за экспоненциального роста вычислительной сложности, тогда как эвристические методы не обеспечивают необходимого качества и устойчивости решений. Анализ задач маршрутизации показал эффективность гибридных метаэвристических алгоритмов, что обосновывает выбор соответствующего подхода.

Таким образом, в первой главе обоснована необходимость разработки расширенной математической модели маршрутизации с комплексными ограничениями и специализированных алгоритмов оптимизации, что определяет содержание и направленность исследований.

Вторая глава диссертации «**Математические модели и алгоритмы взаимодействия данных информационной системы транспортной логистики**» посвящена разработке и исследованию математического и алгоритмического обеспечения ИС транспортной логистики.

В параграфе 2.1 представлена формальная постановка задачи маршрутизации как задачи дискретной оптимизации на ориентированном графе с ресурсными и структурными ограничениями, относящейся к классу NP-трудных. Модель сформулирована в терминах целочисленного линейного программирования с использованием подхода Миллера–Такера–Землина, основанный на введении бинарных переменных и линейных ограничений связности, что обеспечивает алгоритмическую реализуемость и возможность теоретического анализа.

В параграфе 2.2 предложена концепция временного слоя как механизм учёта временной динамики транспортной сети. Центральная идея состоит в том, что параметры дуг дорожного графа целесообразно моделировать не одним значением, а набором значений по временным интервалам (слоям), отражающим режимы движения. Математическая формализация временного слоя определяется следующим образом:

Пусть $T = [0, T_{max}]$ - рассматриваемый период планирования (например, год, месяц, неделя). Временной слой определяется как разбиение:

$$T = \bigcup_{k=1}^K T_k, \text{ где } T_i \cap T_j = \emptyset \text{ при } i \neq j, \quad (1)$$

где T_k - k -й временной слой, K - общее число временных слоёв.

Для каждого временного слоя T_k определяется набор параметров:

$$\Theta_k = \{v_{ij}^{(k)}, c_{ij}^{(k)}, s_i^{(k)}\}, \quad (2)$$

где $v_{ij}^{(k)}$ – средняя скорость движения по дуге (i, j) в слое k ; $c_{ij}^{(k)}$ – стоимость проезда по дуге (i, j) в слое k ; $s_i^{(k)}$ - время обслуживания клиента i в слое k .

Условие применимости временного слоя имеет вид:

$$\frac{c_{ij}^{(k)} - \bar{c}_{ij}}{\bar{c}_{ij}} \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где \bar{c}_{ij} – среднее значение стоимости проезда по дуге (i, j) за период T , ε – допустимое относительное отклонение, $\varepsilon \in [0.05, 0.15]$.

Ключевым количественным показателем для определения применимости концепции временного слоя используется коэффициент временной вариабельности (CV) дуги $CV_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\bar{c}_{ij}}$, где σ_{ij} – среднеквадратическое отклонение стоимости проезда по дуге (i, j) , \bar{c}_{ij} – среднее значение стоимости.

Предложена классификация транспортных сетей по коэффициенту CV , определяющая целесообразность использования данной концепции в задачах маршрутизации. Коэффициент временной вариабельности существенно различается для различных типов дорог и периодов суток, так в центре города в часы пик CV достигает 0,60-0,75, тогда как для загородных участков $CV < 0,15$. Это подтверждает наличие выраженной временной динамики параметров сети и обосновывает введение концепции временного слоя для формального учёта изменяющейся графовой структуры транспортной системы.

Сформированы математические критерии применимости концепции временного слоя для различных типов транспортных сетей на основе коэффициента временной вариабельности, периодичности изменений и показателей экономической эффективности.

Для автоматического определения числа и границ временных слоёв разработан алгоритм, включающий нормализацию временных рядов стоимостей, векторизацию моментов времени и их кластеризацию методом K-means++. Оптимальное число кластеров определяется на основе критерия силуэта с последующей верификацией полученного разбиения на соответствие критериям применимости и оценкой параметров каждого временного слоя.

В параграфе 2.3 на основе разработанной концепции временного слоя предложен модифицированный алгоритм муравьиных колоний – Time-Layer Adaptive Ant Colony Optimization (TLA-ACO), интегрирующий многослойную временную структуры транспортной сети непосредственно в процессы построения маршрутов и обновления феромонных следов.

Граф $G = (V, A)$, временные слои $\{T_1, \dots, T_k\}$, параметры Θ_k для каждого слоя. Лучший найденный маршрут R^* и его стоимость Z^* .

Шаг 1. Для каждого слоя $k = 1, \dots, K$ вычислить CV_k по формуле $CV_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\bar{c}_{ij}}$.

Инициализировать феромон $\tau_{ij}^k \forall (i, j) \in E, \forall k$ по формуле $\tau_{ij}^{(k)}(0) = \frac{1 + CV_k}{n}$.

Вычислить адаптивные параметры $\alpha_k, \beta_k, \rho_k$ по формулам $\alpha_k = \alpha_0(1 - \gamma \cdot CV_k)$, $\beta_k = \beta_0(1 + \gamma \cdot CV_k)$, $\rho_k = \rho_0(1 + \lambda CV_k)$. Задать параметры, q_0 – вероятность детерминированного выбора, ψ – коэффициент трансфера, θ – параметр штрафа временной согласованности.

Шаг 2. Для каждого муравья $m = 1, \dots, M$. Поместить муравья в депо (вершина 0), установить $t_0 :=$ время начала маршрута. Определить начальный слой k такой, что $t_0 \in T_k$. Считать множество M_m посещённых клиентов пустым. $V_m := \emptyset$.

Пока существуют непосещённые клиенты и не исчерпана вместимость:

а) Вычислить вероятности $p_{i,j}^{m,(k)}$ по формуле

$$p_{ij}^{m,(k)} = \frac{(\tau_{ij}^{(k)})^{\alpha_k} (\eta_{ij}^{(k)})^{\beta_k} \cdot \phi_{ij}^{(k)}}{\sum_{l \in N_i^m} (\tau_{il}^{(k)})^{\alpha_k} (\eta_{il}^{(k)})^{\beta_k} \cdot \phi_{il}^{(k)}} \text{ или по формуле } \tau_{ij}^{(k)} \leftarrow \tau_{ij}^{(k)} \left(1 - \xi \frac{L_k}{R_k}\right), \quad (i, j) \in R.$$

б) С вероятностью q_0 выбрать вершину с максимальным значением, иначе - стохастически.

в) Вычислить прогнозируемое время \hat{t}_j по формуле

$$\hat{t}_j = t_i + s_i^{(k)} + \frac{d_{ij}}{v_{ij}^{(k)}}.$$

д) Если $\hat{t} \in T_{k'}, k' \neq k$ выполнить трансфер феромона $\tau_{ij}^{(k')} \leftarrow (1 - \psi) \tau_{ij}^{(k')} + \psi \cdot \mu_{kk'} \cdot \tau_{ij}^{(k)}$, обновить $k := k'$.

е) Выполнить локальное обновление феромона $\tau_{ij}^k \leftarrow (1 - p_k) \tau_{ij}^k + \rho_k \tau_0^{(k)}$.

ф) Добавить вершину j в маршрут, обновить текущее время t_j . Вернуть муравья в депо, вычислить общую стоимость маршрута Z_m . Определить лучший L_k и худший R_k маршруты для каждого слоя k . Выполнить глобальное обновление феромона по формуле $\tau_{ij}^k \leftarrow (1 - p_k) \tau_{ij}^k + \Delta \tau_{ij}^{(k)} - w_k = \frac{\Delta t_k}{T} (1 + CV_k)$. Если $Z_m < Z^*$, обновить $R^* := R_m, Z^* := Z_m$.

Шаг 3. Вернуть R^* и его стоимость Z^* .

В параграфе § 2.4. подтверждена эффективность разработанного алгоритма TLA-ACO вычислительными экспериментами на задачах маршрутизации различной размерности (20–500 клиентов) при разных уровнях временной изменчивости транспортной сети. Экспериментальные сценарии сформированы на основе классификации сетей по коэффициенту CV .

Экспериментальная часть включает сравнение качества решений TLA-ACO с классическим AS, модифицированным MACO и генетическим алгоритмом. Результаты показывают наибольшее преимущество TLA-ACO в сетях с высокой временной изменчивостью. Показано, что оптимальное число временных слоёв (рис. 2) определяется степенью временной вариабельности сети и может быть оценено эмпирической формулой $K^* \approx 2 + 15 \cdot CV$.

Анализ сходимости (рис. 3) подтвердил устойчивость поиска без преждевременной стагнации. Качество маршрутов улучшилось на 10–15% для стабильных сетей и до 40–50% с выраженной временной динамикой.

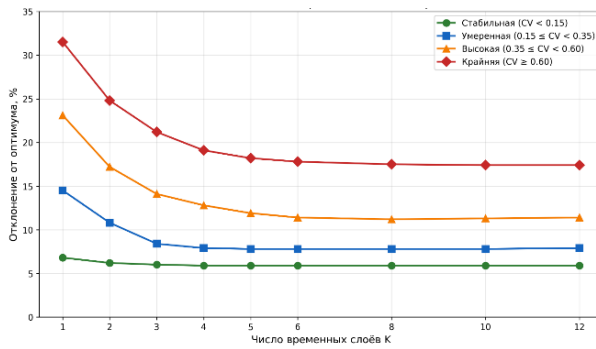


Рис. 2. Зависимость отклонения оптимума от числа временных слоев

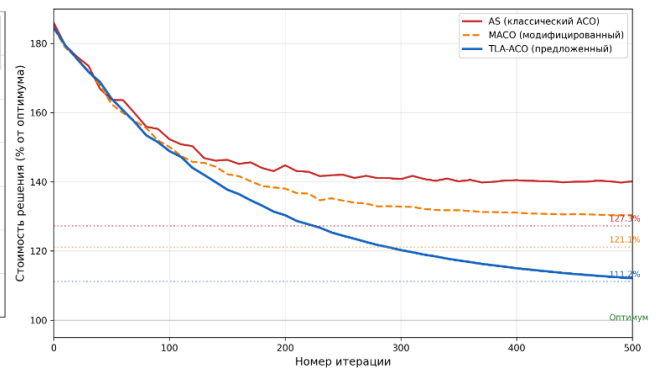


Рис. 3. Динамика сходимости алгоритмов

Апробация на реальных данных показала снижение затрат на доставку до 19% и сокращение нарушений временных окон, что подтверждает прикладную значимость предложенного алгоритма.

Третья глава диссертационной работы под названием «Эволюционный гибридный подход к оптимизации транспортной маршрутизации» посвящена эволюционно-гибридному подходу к оптимизации маршрутизации и включает построение математической модели и разработку гибридного алгоритма для класса задач, обозначенного в диссертации как CVRPTW-LIFO (ограниченная грузоподъемность, временные окна и технологическое правило «последний загружен — первый разгружен», относящихся к классу NP-трудных комбинаторных задач оптимизации.

Целевая функция сводится к минимизации суммарного экономического и штрафного показателя по всем автомобилям и назначенным им маршрутам и имеет следующий вид:

$$F = \sum_{j \in V} \sum_{k \in R} y_{jk} (L(r_k)T(v_j) + p(r_k) + \alpha D_{jk} + \beta P_{jk}) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $L(r_k) \cdot T(v_j)$ - затраты на транспортировку грузов транспортным средством (ТС) v_j по маршруту r_k , $p(r_k)$ - базовая стоимость использования маршрута, D_{jk} - штрафная функция опоздания и нарушений временных окон, P_{jk} - совокупный штраф за технологические нарушения (включая LIFO), α - весовой коэффициент при штрафе D_{jk} ($\alpha \gg \beta$ для скоропортящихся грузов), β - весовой коэффициент при штрафе P_{jk} .

Система ограничений включает, в частности, ограничения по грузоподъемности и вместимости:

$$Q_v^w \geq \sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot w_i, \quad Q_v^v \geq \sum_{i=1}^n x_{ij} \cdot v_i, \quad \forall j \in V, \quad (5)$$

А также ограничение порядка загрузки/разгрузки (LIFO), задающее связь порядка обслуживания и фактических времён разгрузки:

$$t(r_k) + t_{ij} \leq d_i, \quad \forall i \in G, \forall r_k \in R, \quad (6)$$

где d_i - максимальное время доставки груза (дедлайн); $t(r_k)$ - время прохождения маршрута, $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ - множество грузов.

Ограничение порядка загрузки и выгрузки: если $o_{ij} > o_{il}$, то груз g_i должен быть выгружен позже груза g_l , назначенного на то же ТС:

$$o_{ij} > o_{il} \Rightarrow t_{ij} > t_{il}, \quad \forall j \in V, \forall i, l \in G, \quad (7)$$

Анализ показал, что классические методы маршрутизации и ройные алгоритмы (в частности, АСО) демонстрируют ограниченную эффективность при наличии LIFO-ограничений и жёстких временных окон, что обосновывает необходимость применения гибридных эволюционных методов.

В параграфе § 3.2. предложен гибридный эволюционный алгоритм, сочетающий дифференциальную эволюцию (DE), генетический алгоритм (GA) и локальный поиск на основе метода переменного соседства (VNS).

Для кодирования решений используется маршрутная хромосома-перестановка с разделителями маршрутов:

$$\pi = \langle 0, \pi_1, \dots, \pi_{k_1}, 0, \pi_{k_1+1}, \dots, \pi_{k_1+k_2}, 0, \dots \rangle, \quad (8)$$

что позволяет применять операторы рекомбинации, сохраняя структуру маршрутов. Оценка качества особи выражается через целевую функцию с учётом штрафов:

$$F(\pi) = \sum_{j \in V} \sum_{k \in R} y_{jk}(\pi) [L(r_k)T(v_j) + p(r_k) + \alpha D_{jk}(\pi) + \beta P_{jk}(\pi)] \rightarrow \min, \quad (9)$$

Штраф за опоздание определяется как:

$$D_{jk} = \sum_{i \in r_k} \max(0, t_{ij} - T_i^{\max}), \quad (10)$$

где t_{ij} – фактическое время прибытия к клиенту i , i – индекс заявки/партии груза (заказа, клиента), т.е. отдельной единицы перевозки; если доставка выполнена вовремя, штраф равен нулю. T_i^{\max} – дедлайн клиента, т.е. если $t_i \leq T_i^{\max}$, то штраф не применяется, равен нулю.

Штраф за нарушение ограничений вместимости и принципа погрузки/разгрузки LIFO рассчитывается в размере:

$$P_{jk} = \gamma_1 \cdot \max\left(0, \sum_i w_i - W_j\right) + \gamma_2 \cdot \max\left(0, \sum_i v_i - V_j\right) + \gamma_3 \cdot H_{jk}, \quad (11)$$

где $H_{jk} \in \{0, 1\}$ фиксирует факт нарушения LIFO.

Гибридный эволюционный алгоритм DE-GA+VNS работает итеративно. Каждое поколение последовательно проходит следующие фазы:

1-шаг. DE-мутация. Для текущей особи формируется мутационный вектор $m_i = x_{r_1} + \mu(x_{r_2} - x_{r_3})$, где μ -коэффициент мутации. Он обеспечивает эффективную глобальную разведку пространства решений и является ключевым механизмом алгоритма DE.

2-шаг. DE-кроссовер. Выполняется бинарный DE-кроссовер между целевой особью и мутантом, формируя пробную особь

$$u_{i,j} = \begin{cases} m_{i,j} & \text{если } d_j < CR \\ x_{i,j} & \text{иначе} \end{cases},$$

3-шаг. GA-кроссовер маршрутов (скрещивание элиты). Применяется к лучшим особям текущей популяции с вероятностью $p_c = 0.7$ для рекомбинации удачных подмаршрутов.

4-шаг. GA-мутация. Вносит небольшие случайные изменения с вероятностью $p_m = 0.05$, поддерживая разнообразие популяции.

5-шаг. PSO (Particle Swarm Optimization) -обновление позиций:

$$\mathbf{v}_i = \omega \mathbf{v}_i + \phi_1 r_1 (\mathbf{p}_i - \mathbf{x}_i) + \phi_2 r_2 (\mathbf{g} - \mathbf{x}_i); \mathbf{x}_i \leftarrow \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i,$$

где \mathbf{x}_i , \mathbf{v}_i – векторы позиции и скорости частицы, соответственно; \mathbf{p}_i – лучший локальный маршрут частицы, \mathbf{g} – глобально лучший маршрут популяции; ω – коэффициент инерции ($0,4 \leq \omega \leq 0,9$); ϕ_1, ϕ_2 – коэффициенты веса личного и коллективного опыта; $r_1, r_2 \sim U(0,1)$ – случайные числа, вносящие стохастический элемент в поиск.

6-шаг. Локальный поиск (LS). VNS-улучшение. Дополнительная интенсивная доработка маршрутов операторами 2-opt, relocate, swap с целью интенсивно уменьшить $L(r_k)$ и удалить штрафы D_{jk}, P_{jk} .

7-шаг. Элитарная селекция. Сохранить N лучших особей $\mathbf{P}_{t+1} = B_N(\mathbf{P}_t \cup \mathbf{U}_t)$. Для следующего поколения отбираются $N=80$ лучших особей, которые формируют основу следующей популяции.

PSO-фаза является опциональной и обеспечивает дополнительное улучшение позиций, без неё алгоритм сохраняет работоспособность.

В параграфе § 3.3. в качестве механизма локальной оптимизации применяется метод переменного соседства (VNS).

Локальный поиск (VNS) реализуется базовыми операторами 2-opt, relocate, swap, включая обмен между маршрутами, и формализуется условием принятия улучшения:

$$\pi' = \arg \min_{\sigma \in N_k(\pi)} F(\sigma), \quad \text{if } F(\pi') < F(\pi), \text{ тогда } \pi \leftarrow \pi', \quad (12)$$

или, в виде логического условия:

$$\exists k \in \{1, 2, 3\} : \min_{\sigma \in N_k(\pi)} F(\sigma) < F(\pi) \Rightarrow \pi \leftarrow \arg \min_{\sigma \in N_k(\pi)} F(\sigma), \quad (13)$$

Для выражения факта остановки итераций, уравнение (12) запишем как:

$$\forall k \in \{1, 2, 3\} \Rightarrow \min_{\sigma \in N_k(\pi)} F(\sigma) \geq F(\pi) \Rightarrow \text{переход на следующий этап.} \quad (14)$$

VNS-компонент снижает риск застревания в локальных минимумах и повышает воспроизводимость качества решений. При нахождении улучшения возвращается к базовой окрестности, что повышает устойчивость сходимости.

В параграфе § 3.4. интегрирован механизм самоадаптации SaDE для повышения устойчивости и снижения чувствительности к настройке параметров в гибридный алгоритм. Параметры мутации и кроссовера автоматически корректируются на основе успешности предыдущих итераций, снижая необходимость ручной настройки.

Приводится схема обновления среднего значения для параметра кроссовера $\mu_{CR}^k \leftarrow (1 - c) \mu_{CR}^k + c \overline{CR}_s$, а успешность оценивается через:

$$SR(\mu_i, CR_i) = \frac{N_s(\mu_i, CR_i)}{N_t(\mu_i, CR_i)}. \quad (15)$$

Обновление параметров производится по следующим правилам:

$$F_n = F_s + \alpha \cdot (SR_F - 0.5), \quad CR_n = CR_s + \beta \cdot (SR_{CR} - 0.5), \quad (16)$$

где α и β - коэффициенты скорости адаптации ($\alpha = 0.1$, $\beta = 0.1$). На рис. 4. представлены графики адаптации параметров F и CR . Параметры ограничиваются диапазонами $F \in [0.1, 0.9]$, $CR \in [0.5, 1.0]$.

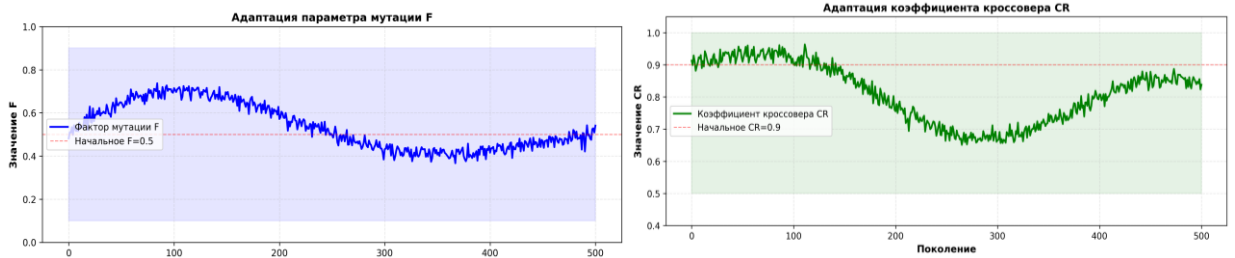


Рис. 4. Адаптация параметров F и CR в процессе эволюции

Устойчивость решений оценивается коэффициентом вариации и вводится практический критерий останова по относительному приросту качества за последние 20 поколений:

$$CV = \left(\frac{\sigma_F}{\mu_F} \right) \times 100\%, \quad \varepsilon = \frac{F_b(t-20) - F_b(t)}{F_b(t)} < 10^{-4}, \quad (17)$$

что интерпретируется как стагнация и основание для завершения эволюционного цикла.

В параграфе § 3.5. разработан самоадаптивный гибридный эволюционный алгоритм DE-GA+LS с механизмом SaDE для решения задач маршрутизации транспортных средств с жёсткими ограничениями.

Экспериментальная проверка гибрида DE-GA+VNS на модифицированных наборах Solomon (S-50, M-100, L-200) демонстрирует существенное преимущество по стоимости решения (табл. 2).

Таблица 2

Результаты вычислительных экспериментов

Алгоритм	F , S-50	Δ (%)	T, с	σ	F , M-100	Δ (%)	T, с	σ	F , L-200	Δ (%)	T, с	σ
GA	32,850	+ 14.6	92	830	66,210	+ 17.4	196	1,490	134,700	+ 18.5	438	2,370
DE	30,740	+7.3	104	540	61,890	+9.4	210	1,120	123,600	+ 10.4	462	1,750
DE-GA-VNS	27,930	0.0	118	380	56,780	0.0	244	690	110,820	0.0	529	1,090
DE-GA-GD	28,160	+0.8	106	480	57,210	+0.8	228	780	111,750	+0.8	505	228
DE-GA-2opt	28,330	+ 1.4	88	450	57,460	+ 1.2	198	915	112,380	+ 1.4	467	1,470

Проведенные вычислительные эксперименты показали улучшение затрат на 8–12% по сравнению с классическим GA и на 5–9% по сравнению с DE при количестве заказов до 200. Помимо DE-GA-VNS были протестированы два упрощённых гибридных варианта: модель DE-GA-GD с ранговым градиентным спуском и вариант DE-GA-2opt.

Статистический анализ устойчивости показали, что применение SaDE позволяет снизить вариабельность решений до 1,4%, что существенно превосходит базовые версии GA и DE.

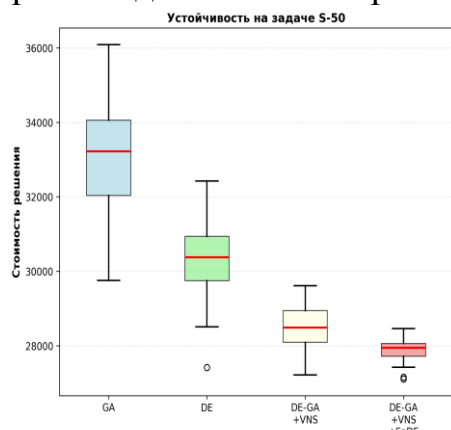


Рис. 5. Анализ устойчивости алгоритмов

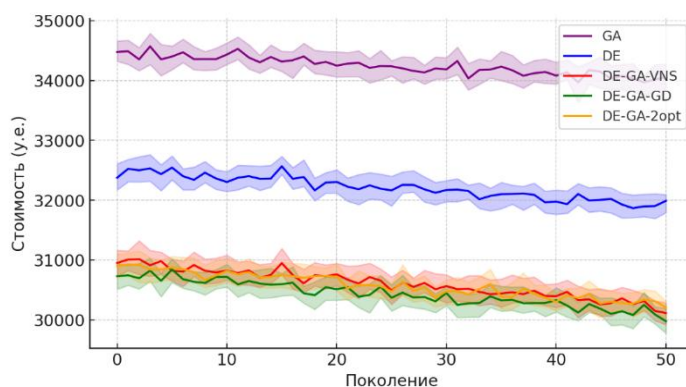


Рис. 6. Кривые стоимости решений для всех алгоритмов и всех трёх размеров задач

Алгоритм обеспечивает снижение совокупных затрат на 14–18% по сравнению с базовыми GA и DE и характеризуется низкой вариативностью результатов $CV \approx 1-2\%$ (рис. 6). Среди вариантов локального поиска DE-GA-VNS даёт наилучшее качество, DE-GA-2opt — на 25% быстрее при потере качества $\leq 1,5\%$, DE-GA-GD – на 10% быстрее при потерях $\sim 0,8\%$. Это подтверждает его эффективность и практическую применимость в ИАС транспортной логистики.

Четвертая глава диссертационной работы «Программная реализация и экспериментальные исследования разработанных моделей и алгоритмов» посвящена разработке программного средства и экспериментальной проверке на тестовых и реальных данных.

В §4.1 трёхуровневая архитектура информационной системы транспортной логистики для поддержки полного цикла управления перевозками сельскохозяйственной продукции – от интеграции данных и планирования маршрутов до мониторинга и анализа эффективности.

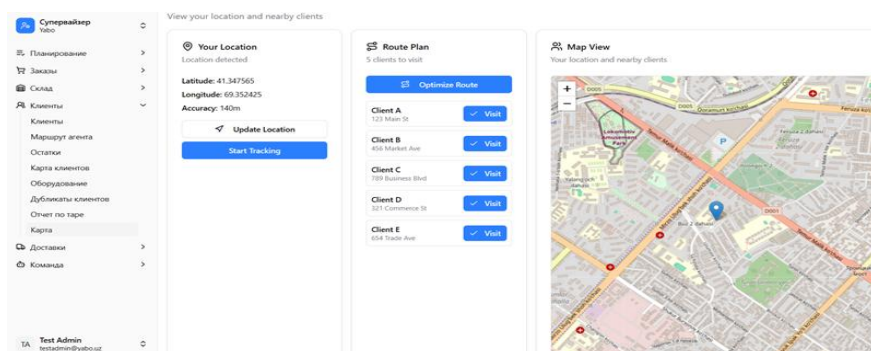


Рис. 7. Окно «Карта и маршрут агента»

Архитектура построена по принципу: информационный уровень обеспечивает интеграцию и хранение данных, алгоритмический реализует модели временных слоёв, TLA-ACO и гибридный DE-GA+VNS с механизмом SaDE и контролем LIFO; управленческий уровень отвечает за настройку,

запуск оптимизации и визуализацию результатов. Система реализована как веб-ориентированный программный комплекс (рис.7), обеспечивающий масштабируемость и интеграцию в ИТ-инфраструктуру предприятия.

В параграфе §4.2. проведены вычислительные эксперименты для оценки корректности и эффективности разработанных алгоритмов на стандартных тестовых наборах Solomon (R, C, RC), адаптированных под постановку CVRPTW-LIFO. Сравнение выполнялось с базовыми алгоритмами GA и DE.

Таблица 3

Сравнение алгоритмов на тестах Solomon (средние значения)

Набор	GA	DE	DE-GA+VNS	Δ от GA (%)	Δ от DE (%)
R101-R112 (12 задач)	1828.4	1756.8	1642.3	-10.2%	-6.5%
C101-C109 (9 задач)	952.6	905.4	841.2	-11.7%	-7.1%
RC101-RC108 (8 задач)	1624.7	1568.3	1482.9	-8.7%	-5.4%
Среднее улучшение	-	-	-	-10.2%	-6.3%

Алгоритм DE-GA+VNS обеспечивает улучшение целевой функции на 10,2% относительно GA и 6,3% относительно DE, с наибольшим эффектом на кластерных задачах, что подтверждает преимущество гибридного подхода для маршрутизации с комплексными ограничениями.

В §4.3 экспериментально подтверждена практическая применимость разработанного программного комплекса на данных трёх логистических предприятий Узбекистана (дистрибуция напитков, перевозка хлопка-сырца и скоропортящейся продукции). Наиболее масштабные испытания (200 заказов, 25 ТС) показали снижение общей дистанции на 13,8%, времени в пути — на 11,5%, расхода топлива — на 13,8%, количества ТС — на 12%, при устранении нарушений LIFO и сокращении времени планирования с 180 до 15 минут; экономический эффект составил 401,3 млн сум в год. По трём объектам суммарный эффект достиг 884,6 млн сум в год при среднем ROI около 340%.

В §4.4 установлено, что учёт ограничений последовательности обслуживания типа LIFO приводит к умеренному увеличению длины маршрутов (в среднем на 2–4%), но полностью устраняет технологические нарушения и связанные с ними дополнительные затраты.

Таблица 4

Статистическая оценка результатов

Тест / Метрика	Соса-Cola (200 зак.)	Хлопок (180 зак.)	Samarkand Logistics
Парный t-тест, p	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,01
Тест Вилкоксона, p	p < 0,01	p < 0,01	p < 0,01
d Коэна	2,83	2,83	2,15
Кэфф. вариации CV, %	1,4%	1,4%	2,1%
Число запусков	30	30	30

Статистическая проверка (парный t-тест, тест Вилкоксона, табл. 4) подтвердила значимость результатов при p<0,01. При 30 независимых запусках

коэффициент вариации составил 1,4-2,1%, что свидетельствует о высокой воспроизводимости алгоритма. Тестирование на бенчмарках Solomon и реальных данных показало устойчивость алгоритма в обоих случаях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана архитектура информационной системы управления грузоперевозками, состоящая из двух взаимосвязанных подсистем (управления грузоперевозками и управления информационными потоками).

2. Разработана концепция временного слоя модели для учета суточных, недельных и сезонных колебаний интенсивности движения в транспортных сетях, позволяющая повысить точность планирования маршрутов в условиях динамически изменяющихся параметров.

3. Разработан модифицированный алгоритм муравьиных колоний для решения задачи транспортной маршрутизации с ограничениями грузоподъемности, основанный на новой формуле распределения вероятностей выбора клиентов с учетом лучших и худших маршрутов, обеспечивающий улучшение качества решений на 8-12%.

4. Разработана математическая модель задачи маршрутизации с ограниченной грузоподъемностью, временными окнами и LIFO-ограничениями (CVRPTW-LIFO), адаптированная для специфики сельскохозяйственной логистики с учетом концепции доставки "точно в срок";

5. Разработан гибридный эволюционный алгоритм DE-GA+VNS, объединяющий дифференциальную эволюцию, генетический алгоритм и локальный поиск с переменной окрестностью, с механизмом переключения между различными стратегиями локального поиска (VNS, градиентный спуск, 2-opt) в зависимости от стагнации процесса оптимизации.

6. Предложен механизм самоадаптации управляющих параметров эволюционных алгоритмов (коэффициента мутации и вероятности скрещивания) на основе анализа их исторической эффективности через механизм SaDE (Self-adaptive Differential Evolution).

7. Сформулирован комплексный критерий останова эволюционного поиска, основанный на относительном изменении стоимости решения (менее 0,1% за 30 итераций), обеспечивающий баланс между качеством решения и вычислительными затратами.

8. Предложена методология интеграции эволюционных алгоритмов в информационные системы транспортной логистики с обеспечением обработки гетерогенных данных о партиях продукции, состоянии транспортных средств и регулятивных ограничениях в режиме реального времени.

9. Внедрение разработанного программного средства и алгоритмов оптимизации привело к снижению общих логистических затрат на 8-12% по сравнению с базовыми эвристическими методами планирования. Сокращение общей протяженности маршрутов составило 5-9%, а количество задействованных транспортных средств на 10-15% при сохранении объемов перевозок.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSc. 09/2025.27.12.T.02.01.M AT DIGITAL TECHNOLOGIES AND
ARTIFICIAL INTELLIGENCE DEVELOPMENT RESEARCH
INSTITUTE**

**DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE
DEVELOPMENT RESEARCH INSTITUTE**

AXMEDJANOVA ZARRINA ISKANDAROVNA

**MODELS AND ALGORITHMS BASED ON EVOLUTIONARY HYBRID
SEARCH FOR DATA INTERACTION IN TRANSPORT LOGISTICS
INFORMATION SYSTEMS**

05.01.03 – Theoretical basis of computer science

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

Tashkent – 2026

The theme of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under the number B2025.2.PhD/T5624.

The dissertation has been prepared at the Digital Technologies and Artificial Intelligence Вумудщзъуте Research Institute.

The abstract of dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is placed on the web-page of Scientific Council (www.airi.uz) and Information and Educational Portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Scientific adviser: **Sulyukova Larisa Faritovna**
Doctor of Technical Sciences (DSc), Senior researcher

Official opponents: **Tashev Azat Aripovich** (Kazakhstan)
Doctor of Technical Sciences, Professor

Muhamediyeva Dilnoz Tulkunovna
Doctor of Technical Sciences, Professor

Leading organization: **Tashkent State Transport University**

The defense will take place on “ _____ ” _____ 2026 at _____ the meeting of Scientific council No. DSc.09/2025.27.12.T.02.01.M at the Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute (Address: 100125, Tashkent city, M. Ulugbek district, Buz-2, 17A. Tel.: (+99871) 263-41-98; e-mail: info@airi.uz).

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

Abstract of dissertation sent out on “ _____ ” _____ 2025 y.
(mailing report No. _____ on “ _____ ” _____ 2025 y.)

N. Ravshanov
Chairman of the scientific council
on awarding scientific degrees,
doctor of Technical Sciences, Professor

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

N.Mirzaev
Chairman of the academic seminar at the
scientific council on awarding scientific degrees,
doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work is to develop models and algorithmic support for enhancing the efficiency of solving combinatorial transport routing problems based on evolutionary hybrid search with self-adaptive mechanisms.

The object of the research work is combinatorial optimization problems in transport routing.

The scientific novelty of the research work consists of the following:

a time-layer concept was developed based on modeling the dynamic changes of transport network parameters;

a modified ant colony algorithm that incorporates time layers was developed, improving solution quality by 8-12% while maintaining time complexity;

a hybrid evolutionary algorithm was developed based on differential evolution, a genetic algorithm, and local search with a parameter self-adaptation mechanism.

Implementation of the research results. Based on the developed mathematical models for constrained routing problems and evolutionary hybrid search algorithms:

an information system for freight transportation management was implemented in the operations of "Samarkand Logistics" LLC (certificate from the Khokimiyat of the Samarkand Region, Republic of Uzbekistan, dated December 1, 2025, No. 02-02/8133). In the result reduced logistics costs by 8-12% and accelerated;

a software suite for route optimization, considering complex constraints such as load capacity, time windows, and LIFO-based operational sequencing, was implemented at "Coca-Cola Ichimligi Uzbekistan, LTD" LLC (certificate from the Khokimiyat of the Samarkand Region, Republic of Uzbekistan, dated January 1, 2025, No. 02-02/8133), enabling the automatic processing of up to 200 orders using a fleet of up to 25 vehicles, reducing logistics costs, ensuring integration with the ERP system, and providing solution stability with a coefficient of variation of 1.4%;

a software suite, created based on an adaptive hybrid evolutionary algorithm with parameter self-adaptation mechanisms and automatic search strategy selection, was implemented in the operations of "Marokand Khumo Services" LLC (certificate from the Khokimiyat of the Samarkand Region, Republic of Uzbekistan, dated January 1, 2025, No. 02-02/8133), which accelerated route formation and order distribution by 5-7% and ensured the effective coordination of departments.

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

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

I бўлим (1 часть; part 1)

1. Sulyukova L.F., Akhmedjanova Z.I. Improvement of the information system of cargo transportation routing management // V International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO - 2023). E-ISSN: 2267-1242. Vol. 401(05011). Tashkent, Uzbekistan, July 11, 2023. Pp. 1-11. (№3, Scopus, IF=1.1)

2. Sulyukova L.F., Axmedjanova Z.I. Evolutionary hybrid search for optimization in transport logistics information systems // Vibroengineering Procedia, ISSN: 2538-8479. December 22, 2025. Vol. 60. Pp. 641-649. (№3 Scopus, IF=0.9)

3. Сулюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И. Алгоритмы решения задач маршрутизации транспорта и их применение в информационных системах управления грузоперевозками // Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий. ISSN – 2181-3086. 2022. – Т. 2, № 2. – С. 40-52. (05.00.00; № 31).

4. Сулюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И. Модели и алгоритмы обработки данных в транспортной логистике сельскохозяйственных регионов с использованием многокритериальных эволюционных алгоритмов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – № 6(62). – С. 125-135. (05.00.00; № 23).

5. Sulyukova L.F., Axmedjanova Z.I. Evolutionary approach to solving a transport problem with genetic algorithms// Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2025. – № 2/2(66). – С. 60-69. (05.00.00; № 23).

6. Сулюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И., Шамсиев Р.З., Самоадаптирующийся гибридный эволюционный алгоритм для оптимизации транспортной логистики: разработка, анализ устойчивости и практическое применение// Цифровая трансформация и искусственный интеллект. – 2025. – Т. 3, № 6. – С. 77-86. (05.00.00; № 16).

7. Ахмеджанова З.И. Применение эволюционного гибридного поиска в информационной системе транспортной логистики// Узбекский журнал Проблемы информатики и энергетики. – 2025. № 3. – С. 81-91. (05.00.00; № 5).

II бўлим (2 часть; part 2)

8. Сулюкова Л.Ф., Каландаров П.И., Ахмеджанова З.И. Эволюционный подход к решению транспортной задачи грузоперевозок в сельском хозяйстве// ISSN 3034-2856. Международный журнал аграрной науки и образования. Москва, 2024. № 1. С. 122-131.

9. Ахмеджанова З.И., Авазов У. Применение информационных технологий в управлении транспортной логистики Международные оценочные исследования в образовании: практические проблемы и задачи на

перспективу: материалы международной научно-практической конференции. Самарканд, 2022- год 2-декабря С. 262-264.

10. Сулюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И. Построение модели поиска оптимальных маршрутов автомобильных грузоперевозок // Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий: сборник докладов международной научно-практической конференции, г. Нукус, 2-3 мая 2023г.: в 2 ч. Ч 2. – С. 306-308.

11. Сулюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И. Анализ проблем управления в транспортной логистике// Проблемы применения современных информационных, коммуникационных технологий и IT-образования: материалы республиканской научно.-практической конференции, г. Самарканд Филиал ТУИТ им. Мухаммада ал-Хоразмий, 7-8 апреля 2023г. С. 326–327.

12. Сулюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И. Модели и алгоритмы взаимодействия данных в информационных системах транспортной логистики на основе многокритериального эволюционного алгоритма в сельскохозяйственных местностях // Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта: сборник докладов международной научно-технической конференции, г. Бухара, 27-28 сентября 2024 г.: в 2 ч. Ч. 2 / Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта. – Ташкент: изд-во НИИ РЦТИИ, 2024. – С. 232-238.

13. Сулюкова Л.Ф. Ахмеджанова З.И. Разработка эволюционно-гибридного алгоритма решения оптимальных задач маршрутизации транспортных средств // Международная научно-практическая конференция "Роль цифровых технологий в экономике и образовании", Самарканд, 26-27 апреля 2024 г. – С. 244-247.

14. Ахмеджанова З.И. Применение эволюционных алгоритмов в транспортной логистике// Проблемы применения современных информационных, коммуникационных технологий и IT-образования: Материалы республиканской научно-практической конференции. Самарканд, 1-2 ноября, 2024. – С. 13-14

15. Сулюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И. Модели и алгоритмы взаимодействия данных в информационных системах транспортной логистики, основанные на эволюционном гибридном поиске// Сборник докладов республиканской научно-практической конференции “Проблемы применения современных информационных, коммуникационных технологий и IT-образования”. Самарканд, 25-26 апреля 2025 года. – С. 37–39

16. Сулюкова Л.Ф., Ахмеджанова З.И. Применение эволюционно гибридного подхода к оптимизации транспортной маршрутизации // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Цифровые технологии и искусственный интеллект: проблемы, достижения и перспективы развития». Самарканд, 24-25 октября 2025 г.: в 2 ч. Ч. 2. – С. 204-206.

17. Sulyukova L.F., Axmedjanova Z.I. Solving data interaction problems in information systems of freight transport logistics in Uzbekistan// Problems and

Solutions of Scientific and Innovative Research. Turkey 2025., Volume 2, Issue. 11.
– P. 229-235.

18. Сулюкова Л.Ф. Ахмеджанова З.И. Решение проблем взаимодействия данных в информационных системах транспортировки грузов сельскохозяйственной продукции // Innovative Achievements in Science. 2025. A collection scientific works of the International scientific conference (27th December, 2025). Chelyabinsk, Russia: "CESS", 2025. Part 46, Issue 1. – P. 123-129.

19. Ахмеджанова З.И., Якубжанова Д.К., Сулюкова Л.Ф. Разработка базы данных для сайта «Грузоперевозка товара» / O'zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reyestrída 16.03.2023 y. ro'yxatdan o'tkazildi. № DGU 23344.

20. Yakubjanova D.K., Sulyukova L.F., Ganiyeva N.A., Buriyev A.K., Latifov G. T. Transport logistikasi axborot tizimi ma'lumotlarining o'zaro ta'siri modeli va algoritmlarini ishlab chiqish // O'zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reyestrída 07.06.2025 y. ro'yxatdan o'tkazildi. № DGU 52777.