

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'IY INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI  
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.13/30.12.2021.T.142.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

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

**ISMAILOV ILXOM TURSUNBAYEVICH**

**URBANIZATSIYA JARAYONLARINI BASHORATLASHDA SUN'IY  
INTELLEKTGA ASOSLANGAN MODEL VA ALGORITMLAR**

05.01.11 – Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekt

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

**Toshkent – 2025**

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

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

**Contents of Dissertation Abstract of the Doctor of Philosophy (PhD) on  
Technical Sciences**

**Ismailov Ilxom Tursunbayevich**

Urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashda sun'iy intellektga asoslangan model va  
algoritmlar.....3

**Исмаилов Илхом Турсунбаевич**

Модели и алгоритмы искусственного интеллекта в прогнозировании  
урбанизационных процессов.....23

**Ismailov Ilkhom Tursunbayevich**

Artificial Intelligence Models and Algorithms in Forecasting Urbanization  
Processes.....43

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works.....46

**RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR VA SUN'IY INTELLEKTNI  
RIVOJLANTIRISH ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI HUZURIDAGI  
ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.13/30.12.2021.T.142.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

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

**ISMAILOV ILXOM TURSUNBAYEVICH**

**URBANIZATSIYA JARAYONLARINI BASHORATLASHDA SUN'IY  
INTELLEKTGA ASOSLANGAN MODEL VA ALGORITMLAR**

05.01.11 – Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekt

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

**Toshkent – 2025**

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/T4193 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 (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida ([www.airi.uz](http://www.airi.uz)) va «Ziyonet» Axborot ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbarlar:**

**Muxamediyeva Dildora Kabilovna**  
texnika fanlari doktori, dotsent

**Rasmiy opponentlar:**

**Rustamov Nasim Tulegenovich**  
texnika fanlari doktori, professor

**Yusupov Ozod Rabbimovich**  
texnika fanlari falsafa doktori (PhD), dotsent

**Yetakchi tashkilot:**

**Muhammad-al Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Nukus filiali**

Dissertatsiya himoyasi Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy tadqiqot instituti huzuridagi DSc.13/30.12.2021.T.142.01 ilmiy kengashning 2025 yil «21» fevral soat 16<sup>00</sup> dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100125, Toshkent sh., M.Ulug'bek tumani, Bo'z-2 mavzesi, 17-A uy. Tel.: (99871) 2634198).

Dissertatsiya ishi bilan raqamli texnologiyalar va sun'iy intellektni rivojlantirish ilmiy-tadqiqot instituti axborot resurs markazida tanishish mumkin. (registratsiya raqami № 54). (Manzil: 100125, Toshkent sh., M.Ulug'bek tumani, Bo'z-2 mavzesi, 17-A uy. Tel.: (99871) 2634198).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil «8» fevral kuni tarqatilgan.  
(2025 yil «16» yanvar dagi 1 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

**R.X. Xamdamov**  
Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy Kengash qoshidagi  
ilmiy seminar raisi,  
texnika fanlari doktori, professor

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Bugungi kunda dunyoning turli mamlakatlarida shaharlarning jadal o'sishi va urbanizatsiya jarayonlarining tezlashuvi kuzatilmoqda. Ushbu jarayon ikki tomonlama ta'sir ko'rsatadi. Bir tomondan, u iqtisodiy rivojlanish va aholi hayot sifatini yaxshilash uchun imkoniyatlar yaratadi. Boshqa tomondan esa, u turli muammolarga olib kelishi mumkin. Bu muammolar jumlasiga atrof-muhitning ifloslanishi va ekologik vaziyatning yomonlashuvi, transport tirbandliklari va infratuzilmaga ortiqcha yuklanish, uy-joy yetishmovchiligi va narxlarning oshishi kiradi. Bundan tashqari, urbanizatsiya jarayonlari ijtimoiy tengsizlikning kuchayishiga, qishloq hududlarining bo'shab qolishiga, shaharlarda jinoyatchilik darajasining oshishiga va shahar aholisining sog'lig'iga salbiy ta'sir ko'rsatishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun shaharlarning rivojlanishini to'g'ri bashorat qilish va urbanizatsiya jarayonlarini modellashtirish muhim ahamiyat kasb etadi. Bu nafaqat ijobiy imkoniyatlardan samarali foydalanish, balki yuqorida sanab o'tilgan salbiy oqibatlarni oldindan ko'ra bilish va ularning oldini olish choralarini ko'rish imkonini beradi.

Jahonda hozirgi vaqtda urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlash va modellashtirish uchun turli dasturiy ta'minotlar va sun'iy intellekt texnologiyalari ishlab chiqilgan va qo'llanilmoqda. Masalan, Xitoy, Amerika Qo'shma Shtatlari, Buyuk Britaniya, Germaniya, Fransiya, Janubiy Koreya, Hindiston va boshqa rivojlangan mamlakatlarda shaharlarning kengayishini bashoratlash, transport oqimlarini optimallashtirish, infratuzilmalarni rivojlantirish kabi masalalar sun'iy intellekt yordamida hal qilinmoqda. Sun'iy intellekt tizimlari, matematik modellashtirish va mashinali o'rganish usullaridan foydalaniladi. Ammo, mavjud yechimlar rivojlanayotgan mamlakatlar sharoitiga to'liq mos kelmaydi va mahalliy xususiyatlarni hisobga olmaydi. Rivojlanayotgan mamlakatlarda urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashda asosan, statistik ma'lumotlarga tayangan holda an'anaviy usullar qo'llaniladi. Intellekt modellashtirish usullaridan foydalanilmaydi. Shuningdek, ushbu mamlakatlar uchun xos bo'lgan omillar, jumladan, infratuzilma darajasi, moliyaviy imkoniyatlar, urbanizatsiya sur'atlari va ijtimoiy-iqtisodiy xususiyatlar yetarlicha hisobga olinmaydi. Bundan tashqari, rivojlanayotgan mamlakatlar uchun sun'iy intellektga asoslangan yechimlar qimmat va murakkab bo'lishi mumkin.

Respublikamizda ham shaharlarning kengayishi, aholiga xizmat ko'rsatish sifatini oshirish, transport oqimlarini optimallashtirish, ijtimoiy-iqtisodiy rivojlanishni ta'minlash kabi dolzarb muammolarga duch kelmoqda. Mamlakatimizdagi urbanizatsiya jarayonlari o'ziga xos xususiyatlarga ega bo'lib, rivojlangan davlatlardan farq qiladi. Shuning uchun, urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashda sun'iy intellektga asoslangan yangi modellar va algoritmlarni ishlab chiqish, rivojlanayotgan mamlakat sharoitida ularni qo'llash muammolarini tadqiq qilish dolzarb vazifalardan biri hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “Urbanizatsiya jarayonlarini tubdan takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PF-5623-son, “Raqamli O‘zbekiston – 2030” strategiyasi to‘g‘risidagi PF-6079-son va “2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi PF-60-son Farmonlari hamda “Sun’iy intellekt texnologiyalarni jadal joriy etish uchun shart-sharoitlar yaratish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-4996-son, “Axborot texnologiyalari sohasida ta’lim tizimini yanada takomillashtirish hamda malakali kadrlar tayyorlashni kuchaytirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-200-son va “2024-2026-yillarda O‘zbekiston Respublikasining ijtimoiy va ishlab chiqarish infratuzilmasini rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PQ-404-son qarorlarida urbanizatsiya jarayonlarini takomillashtirish, sun’iy intellekt texnologiyalarini joriy etish, raqamli transformatsiyani jadallashtirish va infratuzilmani rivojlantirish bo‘yicha muhim vazifalar belgilangan bo‘lib, ushbu me‘yoriy hujjatlarni amalga oshirish mamlakatimizda urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashda sun’iy intellektdan foydalanish masalalarini hal qilishga xizmat qiladi, shuningdek, mazkur dissertatsiya tadqiqoti aynan shu dolzarb muammolarni qamrab olgan bo‘lib, urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashda sun’iy intellektdan foydalanish masalalarini yoritishga qaratilgan va tadqiqot natijalari mamlakatimiz sharoitiga mos sun’iy intellektga asoslangan modellar va algoritmlarni ishlab chiqish, ularni amaliyotga joriy etish orqali ushbu sohada mavjud muammolarni hal etishga muayyan darajada hissa qo‘shadi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining IV. «Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalari rivojlantirish» ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlash va tahlil qilish borasida jahon olimlarining izlanishlari keng qamrovli tadqiqotlarni o‘z ichiga olmoqda. Jumladan, Mingxing Chen, Devid Sattertveyt, Maher Milad Aburas, Anasua Chakraborti, Maykl Batti, Karen Seto, Syuyetsao Li, Je Chu kabi xorijlik olimlar ushbu sohadagi ilmiy ishlarni olib bormoqdalar. Ular turli sun’iy intellekt usullari, masalan, mashinaviy o‘rgatish algoritmlari, chuqur neyron tarmoqlari, chiziqli regressiya kabi modellardan foydalangan holda urbanizatsiya omillarini aniqlash, ma’lumotlarni chuqur tahlil qilish va istiqboldagi holatlarga bashoratlar qilish bo‘yicha samarali yechimlar ishlab chiqmoqdalar.

Tadqiqotlarda sun’iy yo‘ldosh tasvirlari, statistik ko‘rsatkichlar, mahalliy ma’lumotlar bazalari kabi turli xil manba va ma’lumotlardan foydalanilmoqda. Ushbu ma’lumotlarni chuqur tahlil qilish va qo‘shimcha ustuvor omillarni aniqlash urbanizatsiya jarayonlarining keng qamrovli modelini yaratish imkonini beradi. Xorijlik olimlar tomonidan ishlab chiqilgan sun’iy intellektga asoslangan modellar shaharlarning istiqboldagi o‘sishini bashorat qilish, tejamkor transport infratuzilmasini yaratish, aholining ehtiyojlariga mos ravishda uy-joy va ijtimoiy infratuzilmalarni qurish kabi dolzarb masalalarni hal qilishga qaratilgan.

O'zbekistonda ham ma'lumotlarni intellektual tahlil qilish va sun'iy intellekt sohasi bo'yicha M.M.Kamilov, T.F.Bekmurodov, Sh.X.Fozilov, N.Mirzayev, D.T.Muxamediyeva, N.S.Mamatov, S.S.Rajabov, D.K.Muxamediyeva kabi olimlar tomonidan olib borilayotgan tadqiqotlar ham ushbu dissertatsiya ishiga nazariy va amaliy jihatdan muhim asos bo'lib xizmat qiladi. Ular sun'iy neyron tarmoqlari, mashinaviy o'rgatish usullari, modellashtirish va boshqa sun'iy intellekt texnologiyalarini rivojlantirish bo'yicha izlanishlar olib bormoqdalar.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Tadqiqot ishi Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti huzuridagi Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari ilmiy-innovatsion markazi ilmiy tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq holda BV-V-F4-011 «Noaniqlik sharoitlarida ma'lumotlarni intellektual tahlilining noravshan-nokorrekt masalalarini yechish usul va algoritmlari» (2017-2020) mavzularidagi ilmiy tadqiqot loyihalari doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** urbanizatsiya jarayonlari bilan bog'liq statistik ma'lumotlar asosida urbanizatsiya darajasini hamda sun'iy yo'ldoshdan olingan tasvirlar asosida hududlar o'zgarishini bashoratlash model va algoritmlarni ishlab chiqishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

urbanizatsiya jarayonlarni bashoratlash va ta'sir etuvchi omillarning analitik tahlili o'rganish;

ikki tasodifiy o'zgaruvchi o'rtasidagi bog'liqlikni o'lchash usulini qo'llagan holda belgilar fazosini qisqartirish asosida urbanizatsiya darajasini bashoratlash modeli ishlab chiqish;

sun'iy yo'ldoshdan olingan tasvirlar asosida yer sirti qoplami ko'rinishdagi tasvirlarga o'tkazish algoritmi mashinaviy o'rgatish usulini qo'llash orqali takomillashtirish;

bosh komponentalar usuli asosida yer sirti qoplami tasvirlarini o'lchamini kamaytirish yondashuvi ishlab chiqish;

shahar kengayishini bashoratlash uchun chuqur neyron tarmoqlari asosida shahar hududini o'zgarishini baholash arxitektura ishlab chiqish;

mavjud va taklif etilgan algoritmlar asosida dasturiy ta'minot ishlab chiqish, eksprementlar o'tkazish hamda olingan natijalar asosida qiyosiy tahlil qilishdan iborat.

**Tadqiqotning obyekti** ko'p belgilar bilan bog'liq urbanizatsiya darajasi va sun'iy yo'ldosh tasvirlari asosida hududlar o'zgarishini bashoratlash bilan bog'liq jarayonlar qaralgan.

**Tadqiqotning predmeti** statistik ma'lumotlar asosida urbanizatsiya darajasini bashoratlash va sun'iy yo'ldoshdan olingan tasvirlari asosida shahar hududiy kengayishini usul va algoritmi hamda dasturiy ta'minotini tashkil etadi.

**Tadqiqotning usullari.** Ishning nazariy tadqiqotlari matematik analiz, statistik tahlil, tizimli tahlil, mashinaviy o'rgatish, chuqur o'qitish, tasvirlarni tanib olish,

jarayonlarni sinflashtirishning kompyuterli modelidan tajribalar asosi sifatida foydalanilgan hamda tadqiq qilingan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

ikki tasodifiy o'zgaruvchi o'rtasidagi bog'liqlikni o'lchash usulini qo'llagan holda belgilar fazosini qisqartirish asosida urbanizatsiya darajasini bashoratlash modeli ishlab chiqilgan;

sun'iy yo'ldoshdan olingan tasvirlar asosida yer sirti qoplami ko'rinishdagi tasvirlarga o'tkazish algoritmi mashinaviy o'qitish usulini qo'llash orqali takomillashtirilgan;

bosh komponentalar usuli asosida yer sirti qoplami tasvirlarini o'lchamini kamaytirish yondashuvi ishlab chiqilgan;

shahar kengayishini bashoratlash uchun chuqur neyron tarmoqlari asosida shahar hududini o'zgarishini baholash arxitekturasini ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

urbanizatsiya darajasini bashoratlash algoritmlari asosida Samarqand viloyati misolida kelgusi 3 yil uchun urbanizatsiya darajasining bashorat qiymatlari hisoblangan;

urbanizatsiya darajasi va hududlar o'zgarishini bashoratlash model va algoritmlari uchun dasturiy modullar ishlab chiqilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tadqiqotda olingan natijalarning ishonchliligi intellektual tahlil, aniq vaziyatlarni modellashtirish hamda amaliy sohalaridagi tajribalar bilan ta'minlandi. Modelning adekvatligi real ma'lumotlar va tajriba sinovlarida tekshirilib, boshqa yechimlar bilan qiyosiy tahlil qilindi. Shunday qilib, yaratilgan model va algoritm urbanizatsiyani bashoratlashda ishonchli natijalar bera olishi tasdiqlandi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Ushbu dissertatsiya tadqiqotining ilmiy ahamiyati urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashda sun'iy intellektga asoslangan yangi model va algoritmlarni ishlab chiqishdan iborat. Yaratilgan modellar va algoritmlar urbanizatsiya omillarini noravshan sharoitlarda tahlil qilish, ma'lumotlarni qayta ishlash hamda aniq bashoratlar berish imkonini yaratadi. Tadqiqot natijalari shaharlarning kelgusidagi rivojlanishini oldindan aytib berish, transport va ijtimoiy infratuzilmalarni rejalashtirish kabi dolzarb masalalarni hal qilishda qo'l keladi. Ishlab chiqilgan yechimlar shahar boshqaruvi tizimlarida qarorlar qabul qilishni qo'llab-quvvatlash uchun foydalanilishi mumkin.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati yaratilgan dasturiy mahsulotlar orqali shaharlarning hududiy kengayishini bashorat qilish va urbanizatsiya jarayonlarini monitoring qilish imkoniyati mavjudligi bilan izohlanadi. Ushbu dasturiy vositalar shahar arxitektorlari, yo'l quruvchilar, transport muhandislari va boshqa mutaxassislar tomonidan qo'llanilishi mumkin. Natijada, shaharsozlik loyihalarining sifati oshadi va aholining turmush darajasi yaxshilanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** urbanizatsiya darajasi va hududlar o'zgarishini bashoratlash uchun ishlab chiqilgan model va algoritmlar asosidagi ilmiy natijalar:



o'rama rekurrent neyron tarmoq arxitekturasida hududlar o'zgarishini bashoratlash uchun modeli Samarqand shahar me'moriy loyihalarini rejalashtirish maqsadida Samarqand viloyati hokimligi huzuridagi "AKT rivojlantirish markazi"da joriy qilingan (O'zbekiston Respublikasi Samarqand viloyati hokimligining 2024-yil 2-maydagi № 02-02/240-son ma'lumotnomasi). Natijada shahar me'moriy loyihalarini rejalashtirish ish unumdorligini oshirish imkonini bergan.

urbanizatsiya darajasini bashoratlash modellari uchun o'zaro axborot o'lchovi asosida belgilar fazosini kamaytirish va lokal vaznli silliqashtirish strategiyasiga asoslangan kichik o'quv tanlanmalardan foydalanib urbanizatsiya darajasini bashoratlash algoritmlari Samarqand viloyati statistika boshqarmasida aholi punktlarining rivojlanish tendensiyalarini aniqlash maqsadida qo'llangan (O'zbekiston Respublikasi Samarqand viloyati hokimligining 2024-yil 2-maydagi № 02-02/240-son ma'lumotnomasi). Natijada infratuzilma loyihalarini ishlab chiqish jarayonini ketadigan vaqtni kamaytirish hamda bashoratlash aniqligini oshirish imkonini bergan.

sun'iy yo'ldoshdan olingan tasvirlar asosida yer sirti qoplamasi tasvirlarga o'tkazish algoritmi va o'rama rekurrent neyron tarmoq arxitekturasida hududlar o'zgarishini bashoratlash uchun modeli Davlat kadastrlari palatasi Samarqand shahar filialida yer kadastr ma'lumotlarini yangilash maqsadida joriy etilgan (O'zbekiston Respublikasi Samarqand viloyati hokimligining 2024-yil 2-maydagi № 02-02/240-son ma'lumotnomasi). Natijada yer kadastr ma'lumotlarini yangilash ish unumdorligini oshirishga imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarning aprobatyasi.** Dissertatsiyaning asosiy nazariy va amaliy natijalari 8 ta xalqaro va 1 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarning e'lon qilinganligi.** Tadqiqotning asosiy natijalari 14 ta ilmiy ishlarda e'lon qilingan, ulardan 6 ta O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda, jumladan 3 tasi xorijiy va 3 tasi respublika jurnallarida nashr qilingan hamda 2 ta EHM uchun yaratilgan dasturiy vositalarini qaydlash guvohnomalari O'zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligidan olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to'rt bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati hamda ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 112 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya ishining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, tadqiqot maqsadi va vazifalari hamda obyekt va predmetlari tavsiflangan, O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyasi taraqqiyotining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqot ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan,

tadqiqot natijalarini joriy qilish holati, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Urbanizatsiyani bashoratlash masalasini yechishni analitik tahlili”** deb nomlangan birinchi bobida urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlash va modellashtirish bo'yicha mavjud usullar, muammolar va yondashuvlar tahlil qilingan. Urbanizatsiya jarayonlarining murakkabligi, ko'p omilliligi va dinamik tabiati tufayli ularni bashoratlash qiyin ekanligi ta'kidlangan. Mavjud yondashuvlarning afzalliklari va kamchiliklari ko'rsatilgan. Xususan, ma'lumotlarning sifati, to'liqligi va ishonchliligi bilan bog'liq muammolar, modellarning murakkabligi, noaniqlik va tasodifiylik omillarini hisobga olish zarurati kabi masalalar yoritilgan. Bu muammolarni hal qilish uchun zamonaviy axborot texnologiyalari va sun'iy intellekt usullarini qo'llash zarurati asoslab berilgan.

Shu bilan birga, dissertatsiyaning birinchi bobida urbanizatsiya jarayonlarini bashorat qilishning turli modellari tahlil qilingan bo'lib, unda logistik o'sish modeli shaharlarning vaqt davomida o'sish tendensiyalarini ifodalashda qo'llanilishi, hujayrali avtomatlar shaharsozlik o'zgarishlarini makonda modellashtirish imkonini berishi, agentga asoslangan modellar shaharda yashovchi aholining xatti-harakatlarini simulyatsiya qilishi, Markov zanjiri urbanizatsiya holatlarining o'zgarishini ehtimoliy tarzda ifodalashi, neyron to'rlar murakkab nochiziqliliklarni o'rganishda samarali ekanligi, geofazaviy modellar makonga oid ma'lumotlarni integratsiyalashda qo'l kelishi va gibrid modellar yuqoridagi yondashuvlarning afzalliklarini birlashtirish imkonini berishi batafsil yoritilgan, shuningdek har bir modelning imkoniyatlari va cheklovlari tahlil qilingan. Modellarning o'zaro taqqoslanishi asosida ularning qo'llanilish sohalari va sharoitlari aniqlab berilgan.

Bundan tashqari, urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashda asosiy e'tibor uchta muhim masalaga qaratilgan bo'lib, birinchi masalada urbanizatsiya darajasining vaqt bo'yicha o'zgarishini bashoratlash ko'rib chiqilgan, ikkinchi masalada chuqur neyron tarmoqlar yordamida shahar hududining maydonini bashoratlash usuli taklif etilgan, uchinchi masalada esa urbanizatsiya darajasi va shahar hududi maydoni orasidagi bog'liqlikni o'rganish uchun allometrik o'sish modeli qo'llanilgan. Ushbu masalalarni yechish orqali shaharlarning kelajakdagi rivojlanishini kompleks baholash va samarali shahar rejalashtirish qarorlarini qabul qilish imkoniyati yaratiladi.

Dissertatsiyaning **“Urbanizatsiyani darajasini bashoratlashda sun'iy intellektga asoslangan model va algoritmlar”** deb nomlangan ikkinchi bobida predmet sohasining bayoni keltirilgan.

Urbanizatsiyani bashoratlashga ta'sir etuvchi omillarni aniqlash qismida demografik, ijtimoiy, iqtisodiy va infrastrukturaviy belgilar o'rganildi. Bu ko'rsatkichlar urbanizatsiya darajasini bashorat qilishda asosiy belgilar sifatida qaralgan. Belgilar soni ko'p bo'lgani uchun ularni kamaytirish masala kelib chiqildi va mutual information (MI) asosida belgilar fazosini kamaytirish algoritmi ishlab chiqildi.

Urbanizatsiya darajasiga ta'sir qiluvchi belgilarni MI asosida belgilarni tanlash algoritmi quyida keltirilgan.

**1-qadam.**  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  va  $(Y)$  belgilar va javob(metka) qiymatlari kiritish.

Quyidagi shaklda kiritish amalga oshiriladi

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,m} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,m} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \mathbf{M} \\ y_m \end{bmatrix},$$

bu yerda  $x_1, x_2, \dots, x_m$  belgilarni ifodalovchi vektor.

**2-qadam.**  $X' = \emptyset$  qiymatni ta'minlash.

**3-qadam.** MI o'lchovini hisoblash:

$$I(x_j; Y) = \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^m P(x_j, y_l) \log \frac{P(x_j, y_l)}{P(x_j)P(y_l)},$$

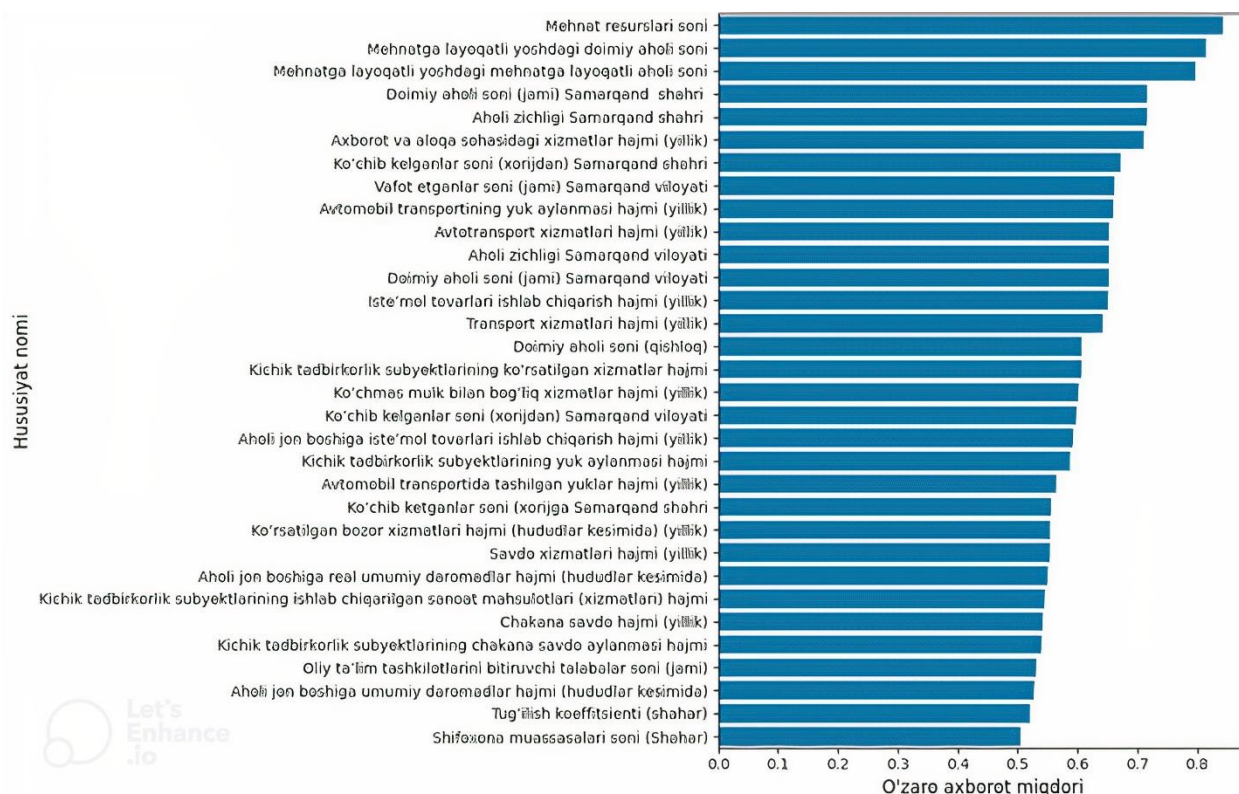
bu yerda  $P(x_j, y) - x_j$  va  $y$  o'rtasidagi qo'shma ehtimollik,  $P(x_j) - x_j$  ning cheklangan ehtimollik taqsimoti,  $P(y) - y$  ning cheklangan ehtimollik.

**4-qadam.** MI o'lchovi miqdori bo'yicha belgilarni tanlash. Har bir belgi bo'yicha  $MI_j > \delta$  shartni tekshirish. Agar shart bajarilsa,  $x_j$  belgi,  $X'$  belgilar to'plamiga kiritish.

**5-qadam.** Algoritmni yakunlash.

O'zbekiston Respublikasi Prezidenti huzuridagi statistika agentligining rasmiy sayti ([www.stat.uz](http://www.stat.uz))dan olingan urbanizatsiyaga ta'sir etuvchi 131 ta belgilar ishlab chiqilgan algoritm asosida quyidagicha kamaytirish amalga oshirildi. Algoritmida  $\delta = 0.5$  qilib tanlanildi, Ushbu qiymat bo'yicha algoritmni bajarish natijasida belgilar fazosi 32 ta belgiga keltirildi. 1-rasmda shartni qanoatlantiruvchi belgilar keltirilgan. Yangi tanlanilgan 32 ta belgilar matrisasi quyidagicha ko'rinishda bo'ldi:

$$X_{32} = \begin{bmatrix} x_{1,(1)} & x_{1,(2)} & \dots & x_{1,(32)} \\ x_{2,(1)} & x_{2,(2)} & \dots & x_{2,(32)} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ x_{n,(1)} & x_{n,(2)} & \dots & x_{n,(32)} \end{bmatrix}.$$



### 1-rasm. Mutual information belgilar fazosini kamaytirish algoritmi asosida tanlab olingan informativ belgilar

Urbanizatsiya darajasini bashorat qilish uchun K-eng yaqin qo'shni (K-Nearest Neighbors, KNN) mashinaviy o'rgatish algoritmi qo'llanildi. U urbanizatsiyaga ta'sir etuvchi omillarning o'xshashligi asosida bashorat qiladi, bunda bashorat qilinayotgan qiymat unga yaqin "k" ta qo'shni qiymatlar asosida aniqlandi.

Tadqiqotda urbanizatsiya darajasi va unga ta'sir qiluvchi 32 ta omil o'rganiladi. Ma'lumotlar hajmi kichik bo'lgani sababli, bashorat aniqligini oshirish uchun KNN modeli lokal vaznli chiziqli regressiya (Locally Weighted Scatterplot Smoothing, LOWESS) yondashuvi bilan birgalikda qo'llanildi.

LOWESS vaqt qatorlaridagi ma'lumotlarni silliqlash uchun ishlatiladi va lokal regressiya orqali murakkab tamoyillarni aniqlaydi. LOWESSdan olingan silliqlangan qiymatlar KNN modeli uchun qo'shimcha o'zgaruvchi sifatida xizmat qiladi.

LOWESS vaqt qatorlaridagi ma'lumotlarni silliqlash va bashoratlash jarayoni quyidagi bosqichlarda amalga oshiriladi:

- 1-bosqich. Dastlabki ma'lumotlar tayyorlanadi.
- 2-bosqich. LOWESS orqali vaqt qatorlari silliqlanadi.
- 3-bosqich. Silliqlangan qiymatlar asosiy ma'lumotlarga qo'shiladi.
- 4-bosqich. KNN modeli quriladi.
- 5-bosqich. Urbanizatsiya darajasi bashorat qilinadi.

Urbanizatsiya darajasini bashoratlash algoritmi quyidagi qadamlardan iborat.

**1-qadam.**  $X^l$  o'quv tanlanmani kiritish.

**2-qadam.**  $\gamma_i = 1$ ; ( $i = 1, \dots, l$ ;) dastlabki koeffitsient qiymatlari o'rnatish.

**3-qadam.** Har bir o‘quv tanlanmadagi obyekt ( $i=1,...,l$ ) uchun siljuvchi nazorat baholashni hisoblash:

$$a_i := a_h(x_i; X^l \setminus \{x_i\}) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^l y_j \gamma_j K\left(\frac{\rho(x_i, x_j)}{h(x_i)}\right)}{\sum_{j=1, j \neq i}^l \gamma_j K\left(\frac{\rho(x_i, x_j)}{h(x_i)}\right)},$$

$$\varepsilon_i = |a_h(x_i; X^l \setminus \{x_i\}) - y_i|.$$

**4-qadam.** Har bir o‘quv tanlanmadagi obyekt ( $i=1,...,l$ ) uchun  $\gamma_i$  koeffitsient yangi qiymatlarini hisoblash:

$$\gamma_i := K(|a_i - y_i|),$$

bu yerda  $\tilde{K}(|a_i - y_i|) = K_Q\left(\frac{|a_i - y_i|}{6 \cdot \text{med}\{\varepsilon_i\}}\right)$ ,  $\text{med}\{\varepsilon_i\}$  xatolarning variatsion

qatorining mediana qiymati,  $K_Q$  kvadratik yadro funksiyasi.

**5-qadam.**  $\gamma_i$  koeffitsient turg‘unlikka tekshiriladi. Agar turg‘un bo‘lsa keyingi qadamga o‘tish, aks holda 3-qadamga o‘tish.

**6-qadam.** Algoritmni yakunlash.

Algoritmni o‘qitish asosida quriladigan  $a$  algoritmning  $\gamma_i$  koeffitsientlari aniqlanadi. Bunda  $K\left(\frac{\rho(x_i, x_j)}{h(x_i)}\right) = \exp\left(-2\left(\frac{\rho(x_i, x_j)}{h(x_i)}\right)^2\right)$  Gauss yadro funksiyasidan foydalanildi.

Bu algoritm asosida keyingi uch yil uchun urbanizatsiya darajasi bashorat qilinadi (1-jadval).

**1-jadval.**

**KNN modeli asosida keyingi 3 yillik urbanizatsiya darajasini bashoratlash natijalari**

Yillar	Bashorat qilingan urbanizatsiya darajasi
2024	13.955564%
2025	14.006889%
2026	14.084194%

Dissertatsiya ishining **“Shahar hududiy kengayishini bashoratlash masalasini yechish model va algoritmlari”** deb nomlangan uchinchi bobida urbanizatsiyada shahar hududiy kengayishini bashoratlash bo‘yicha bir nechta algoritmlar ishlab chiqilgan.

Landsatdan olingan tasvirlarni raqamli ko‘rinishga o‘tkazish quyidagi bosqichlardan iborat.

**1-qadam.** Hududni aniqlash (ROI - Region of Interest). Hudud  $\Omega$  ni aniqlash ifodasi quyidagicha:

$$\Omega = \{(x, y) | x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2\},$$

bu yerda  $(x_1, y_1)$  va  $(x_2, y_2)$  - to'g'ri to'rtburchak shaklini ifodalovchi koordinatalar.

**2-qadam.** Masofadan olingan tasvirlar vaqtlar to'plamini shakllantirish:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, \quad t_i = t_1 + i \cdot \Delta t.$$

**3-qadam.**  $T$  vaqt to'plami asosida masofadan zondlash tasvirlarni to'plamini 7 ta kanal bo'yicha shakllantirish:

$$L^i = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7\},$$

bu yerda  $B_1$  : ko'rinmas ko'k tarmoq;  $B_2$  : ko'k;  $B_3$  : yashil;  $B_4$  : Qizil;  $B_5$  : infraqizil;  $B_6$  : Qisqa to'lqinli infraqizil (Shortwave Infrared 1, SWIR1);  $B_7$  : Qisqa to'lqinli infraqizil (Shortwave Infrared 2, SWIR2).

**4-qadam.** Bulut va qorlar xalaqitlarga ishlov berish. Spektral kanallarda bulut va qor xalaqitlarni aniqlab, tasvirdagi xalaqit sohasini chiqarib tashlash amalga oshiriladi:

$$I(x, y) = I(x, y) \cdot \text{Mask}_{\text{binar}}(x, y),$$

bu yerda  $\text{Mask}_{\text{binar}} = \begin{cases} 0, & \text{agar pikselda bulut yoki qor mavjud bo'lsa,} \\ 1, & \text{aks holda.} \end{cases}$

**5-qadam.** Spektral kanallar bo'yicha indeksni hisoblash. Yer sirti qoplam turini aniqlash uchun spektral indeksni hisoblash:

$$\text{NDVI} = \frac{B_5 - B_4}{B_5 + B_4},$$

$$\text{NDBI} = \frac{B_6 - B_5}{B_6 + B_5},$$

$$\text{MNDWI} = \frac{B_3 - B_6}{B_3 + B_6},$$

$$\text{BSI} = \frac{(B_6 + B_4) - (B_5 + B_2)}{(B_6 + B_4) + (B_5 + B_2)},$$

bu yerda NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – O'simlik qoplam uchun. NDBI (Normalized Difference Built-up Index) - Qurilish yoki antropogen hududlar uchun. MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) - Suv hududlari uchun. BSI (Bare Soil Index) - Bo'sh yoki ochiq yerlar uchun. BSI ochiq tuproq yoki yer yuzasini aniqlash uchun ishlatiladi.

**6-qadam.** O'quv namunalarini yig'ish. Yer sirti qoplam turlarini farqlash uchun har bir turga mos o'quv xususiyatlari yig'iladi.

Xususiyatlar to'plamini quyidagicha keltirib olamiz:

$$X = \{\text{NDVI}, \text{NDBI}, \text{MNDWI}, \text{BSI}\}.$$

Yer sirti qoplam turini aniqlash (Y):

$$Y = \{0, 1, 2, 3, 4\},$$

bu yerda 0: Shahar chegarasi (qora), 1: Qurilish hududi (qizil), 2: Vegetatsiya (yashil), 3: Suv (ko'k), 4: Bo'sh yerlar (kulrang)

**7-qadam.** Tasniflash uchun tasodifiy o‘rmon modelini o‘qitish. O‘quv xususiyatlari va yer sirti qoplami turini bog‘lashni quyidagicha ifodalab olamiz:

$$f(X) = \text{RandomForest}(X).$$

Bu algoritim  $m$  ta daraxt  $(T_1, T_2, \dots, T_m)$  bo‘yicha ishlaydi:

$$f(X) = Q\{T_1(X), T_2(X), \dots, T_m(X)\}.$$

**8-qadam.** Yer sirti qoplami tasvirlarini yaratish. Har bir pixel uchun spektral indekslar hisoblanadi va tasniflagich orqali yer sirti qoplami turi aniqlanadi:

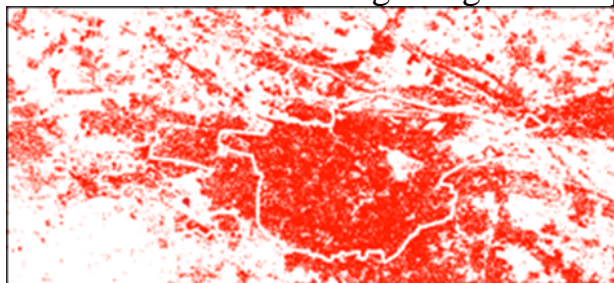
$$\text{Yer\_qoplami}(x, y) = f(X(x, y)).$$

Natijalarni vizuallashtirish:

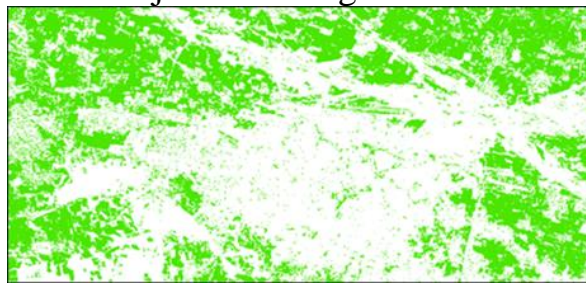
Tasniflash natijalari quyidagi rangli xarita ko‘rinishida tasvirlandi, bu esa turli yer sirti qoplami turlarini oson farqlash imkonini beradi.

Ushbu algoritim asosida tanlanmalar(o‘quv, nazorat tanlanmalari) shakllantiriladi.

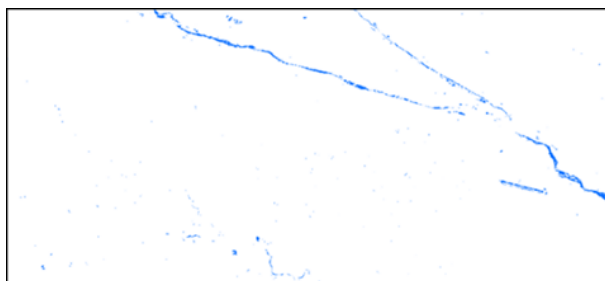
2-rasmda taklif etilgan algoritimni qo‘llash natijalari keltirilgan.



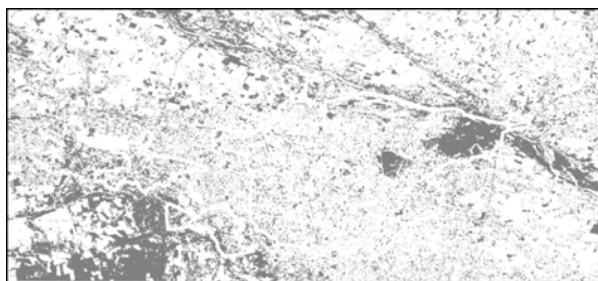
a)



b)



c)



d)

**2-rasm. Samarqand viloyatning 2022 yildagi olingan masofadan olingan kanallar ma‘lumotlariga keltirilgan algoritimni qo‘llash natijalari: a) NDBI; b) NDVI c) MNDWI d) BSI**

Tahlil samaradorligini oshirish maqsadida bosh komponentlar tahlili usuli yordamida yer sirti qoplami tasvirlarning belgilar fazosi kamaytirildi. Bu jarayon natijasida olingan ixcham, ammo informativ ma‘lumotlar to‘plami chuqur o‘qitish modelini samarali o‘qitish imkonini berdi.

**1-qadam.** Ma‘lumotlarni tayyorlash.

Yer sirti qoplami tasvirlarini  $X$  matritsa ko‘rinishida ifodalanadi, bu yerda har bir ustun bir pikselni, har bir satr esa spektral bandni ifodalaydi:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_N],$$

bunda  $N$  – piksellar soni.



**2-qadam.** Ma'lumotlarni standartlashtirish:

$$\bar{X} = X - \mu,$$

bu yerda  $\mu$  – har bir band uchun o'rtacha qiymat vektori.

**3-qadam.** Kovariatsiya matritsasini hisoblash:

$$C = \frac{1}{n-1} * \bar{X}^T * \bar{X}.$$

**4-qadam:** Xos qiymatlar va xos vektorlarni hisoblash.

Kovariatsiya matritsasi  $C$  uchun xos qiymatlar va xos vektorlar topiladi:

$$C * v = \lambda * v,$$

bu yerda  $\lambda$  – xos qiymatlar,  $v$  – xos vektorlar.

**5-qadam.** Asosiy komponentlarni tanlash.

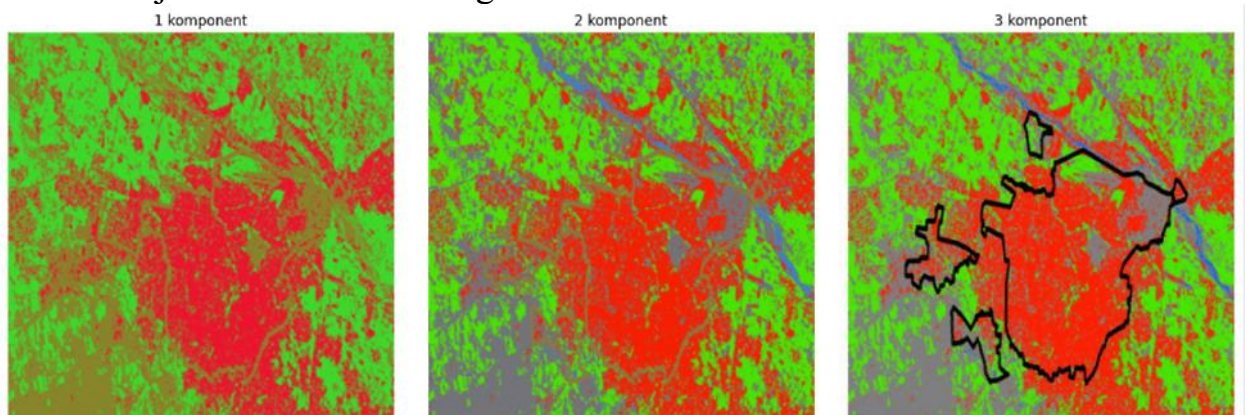
Xos qiymatlarni kamayish tartibida saralab, eng katta  $k$  ta xos qiymatga mos keluvchi xos vektorlarni tanlaymiz. Bu vektorlar proyeksiya matritsasi  $W$  ni tashkil qiladi.

**6-qadam:** Ma'lumotlarni proyeksiyalash:

$$Y = W^T * \bar{X},$$

bu yerda  $Y$  – kamaytirilgan o'lchamli ma'lumotlar.

Natijada 3-rasmda keltirilgan tasvirlar hosil bo'ladi.



**3-rasm. Bosh komponentalar tahlili asosida yer sirti qoplami tasvirlarni belgilar fazosini kamaytirish**

Bosh komponentalar tahlil usuli orqali qayta ishlangan yer sirti qoplami tasvirlari muhim natijalarni ko'rsatdi. Tasvirlar 3 ta asosiy komponentaga ajratilgan bo'lib, birinchi komponentada eng ko'p axborot saqlanib, asosiy yer qoplami sinflari aniq ajratilgan. Ikkinchi komponentada biroz kamroq ma'lumot saqlangan, ammo asosiy sinflar hali ham yaxshi ko'rinib turibdi. Uchinchi komponentada eng kam axborot saqlanib, qora chiziqlar bilan chegaralangan shahar hududi aniq ifodalangan. Bu bosh komponentalar tahlil usuli yordamida qayta ishlangan tasvirlar ConvLSTM algoritmi uchun sifatli kirish ma'lumotlari bo'lib xizmat qiladi, chunki ularda shahar hududining chegaralari va o'zgarish dinamikasi aniq ko'rsatilgan. Bu esa ConvLSTM yordamida shaharning kelajakdagi hududiy kengayishini yanada aniqroq bashorat qilish imkonini beradi. Natijada bosh komponentalar orqali ma'lumotlar hajmini kamaytirib, shu bilan birga asosiy yer sirti qoplami sinflarining xususiyatlarini saqlab qolish mumkin bo'ldi.



Shahar kengayishini bashorat qilishda ConvLSTM arxitekturalaridan foydalanildi.

Yer sirti qoplami tasvirlarini ConvLSTM yordamida vaqt ketma-ketligi asosida bashoratlash - bu konvolyutsion rekurrent neyron tarmoqlar (ConvLSTM) yordamida fazoviy ma'lumotlarning vaqt dinamikasiga asoslanib, tizimning kelajak holatlarini bashorat qilish jarayonidir. Bizda 1990 yildan 2022 yilgacha bo'lgan davr uchun 720 ta yer sirti qoplami tasviri mavjud va biz bu ma'lumotlardan 2023 yil uchun yer sirti qoplami bashorat qilish uchun foydalanamiz.

1. Ma'lumotlarni ifodalash.

1990 yildan 2022 yilgacha bo'lgan yer sirti qoplami ma'lumotlarimizni to'rt o'lchovli tenzor ko'rinishida ifodalab olamiz:

$$X \in R^{T \times H \times W \times C},$$

bu yerda  $T = 720$  - vaqt qadamlari (tasvirlar) soni,  $H$  - har bir tasvirning balandligi (vertikal bo'yicha piksellar soni),  $W$  - har bir tasvirning kengligi (gorizontal bo'yicha piksellar soni),  $C$  - kanallar soni (bu bizda RGB tasvirlar,  $C = 3$ ).

2. ConvLSTM: Model qatlami.

ConvLSTM (Konvolyutsion Uzoq Qisqa Muddatli Xotira) - bu fazoviy ma'lumotlar bilan ishlash uchun standart LSTM ning kengaytirilgan varianti bo'lib, unda holatlar va kirishlar ustidagi operatsiyalar konvolyutsiyalar orqali amalga oshiriladi. Bu vaqtga bog'liq bog'liqliklarni ham, tasvirlar piksellari o'rtasidagi fazoviy o'zaro bog'liqliklarni ham hisobga olish imkonini beradi.

ConvLSTM ning asosiy ko'rinishi quyidagicha hisoblanadi:

Har bir  $t$  vaqt qadami uchun ConvLSTM quyidagi ifodalardan foydalanib o'z holatini yangilaydi:

Unutish geyti  $f_t$  (qaysi ma'lumotni unutish kerakligini aniqlaydi)

$$f_t = \sigma(W_f * X_t + U_f * h_{t-1} + V_f \odot C_{t-1} + b_f).$$

Kirish geyti  $i_t$  (qaysi yangi ma'lumotni saqlash kerakligini aniqlaydi):

$$i_t = \sigma(W_i * X_t + U_i * h_{t-1} + V_i \odot C_{t-1} + b_i).$$

Yangi yacheyka holatining qiymati  $\tilde{C}_t$ :

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c * X_t + U_c * h_{t-1} + b_c).$$

Yachayka holatini yangilash:

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t.$$

Chiqish geyti  $o_t$  (holatning qaysi qismini chiqishga uzatishni hal qiladi)

$$o_t = \sigma(W_o * X_t + U_o * h_{t-1} + V_o \odot C_t + b_o).$$

Yashirin holatni yangilash:

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t).$$

bu yerda  $X_t$  -vaqt qadamida  $t$  dagi kirish tasvir,  $h_{t-1}$  -oldingi vaqt qadamidagi yashirin holat,  $C_{t-1}$  - oldingi vaqt qadamidagi hotira holati,  $f_t$  -unitilish geyti, avvalgi ma'lumotlarni qanchalik unitilishi kerakligini aniqlaydi,  $i_t$  -kirish geyti, yangi ma'lumotlarni qanchalik saqlash kerakligini aniqlaydi,  $\tilde{C}_t$  -yangi potensial xotira

holati,  $C_t$  - yangilangan xotira holati,  $o_t$  - chiqish geyti, yangi yashirin holatga qanday ta'sir qilishini aniqlaydi,  $h_t$  - yangilangan yashirin holat,  $W_f$ ,  $W_i$ ,  $W_c$ ,  $W_o$  - konvalyutsion yadrolar (filtrlar) – kirish tasvirlaridan ( $X_t$ ) olinadigan og'irliklar,  $U_f$ ,  $U_i$ ,  $U_c$ ,  $U_o$  - konvalyutsion yadrolar oldingi yashirin holatdan ( $H_{t-1}$ ) olinadigan og'irliklar.  $V_f$ ,  $V_i$ ,  $V_o$  - xotira ( $C_t$ ) bilan bog'liq og'irliklar,  $b_f$ ,  $b_i$ ,  $b_c$ ,  $b_o$  - baislar-neyron tarmoqdagi qo'shimcha moslashuvi parametrlari.  $\sigma$  - sigmoid aktivatsiya funksiyasi,  $\tanh$  - giperbolik tangens aktivatsiya funksiyasi va  $\odot$  - komponentlar bo'yicha ko'paytirish.

3. Yer sirti qoplami vaqt qatorini bashoratlash quyidagi qadamlarda amalga oshiradi.

**1-qadam:** Ma'lumotlarni tayyorlash.

Yer sirti qoplami ma'lumotlari 720 ta tasvirdan iborat vaqt ketma-ketligiga ega, bu yerda har bir tasvir ma'lum bir vaqt nuqtasidagi yer foydalanish holatini ifodalaydi. Modelni o'qitish uchun ma'lumotlar  $n$  uzunlikdagi segmentlarga tashkil etildi.

$n$  uchun, 10 yillik vaqt uzunligidagi segmentlar kiritiladi:

$$[X_{t-9}, X_{t-8}, \dots, X_t].$$

**2-qadam.** 2023 yil uchun yer sirti qoplami bashoratlash.

ConvLSTM modeli 1990 yildan 2022 yilgacha bo'lgan ma'lumotlar ketma-ketliklarida o'qitiladi. O'qitishdan so'ng, model oxirgi  $n$  yilni kirish sifatida ishlatib, 2023 yil uchun yer sirti qoplami tasvirini bashorat qilinadi.

Bashoratlash jarayonini quyidagicha tasvirlash mumkin:  $\{X_{1990}, X_{1991}, \dots, X_{2022}\}$  vaqt ketma-ketligi uchun, oxirgi  $n$  ta tasvir kiritiladi:

$$X = \{X_{1990}, X_{1991}, \dots, X_{2022}\}.$$

ConvLSTM modeli oldingi yillar ketma-ketligidan olingan vaqtga va fazoga bog'liq bog'liqliklardan foydalanib, keyingi  $\hat{X}_{2023}$  holatini bashorat qiladi.

4. Yo'qotish funksiyasi

Modelni o'qitish uchun bashorat qilingan tasvirlar va haqiqiy yer sirti qoplami tasvirlari o'rtasidagi farqni o'lchaydigan yo'qotish funksiyasi ishlatiladi. Bu ishda biz ishlatiladigan yo'qotish funksiyalaridan biri - bu o'rtacha kvadrat xatolik (**MSE**):

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_t^{(i)} - \hat{X}_t^{(i)})^2,$$

bu yerda  $X_t^{(i)}$   $t$  - vaqtda  $i$  - piksel haqiqiy qiymati.  $\hat{X}_t^{(i)}$   $t$  - vaqtda  $i$  - piksel bashorat qiymati,  $N$  - tasvirda piksellar soni.

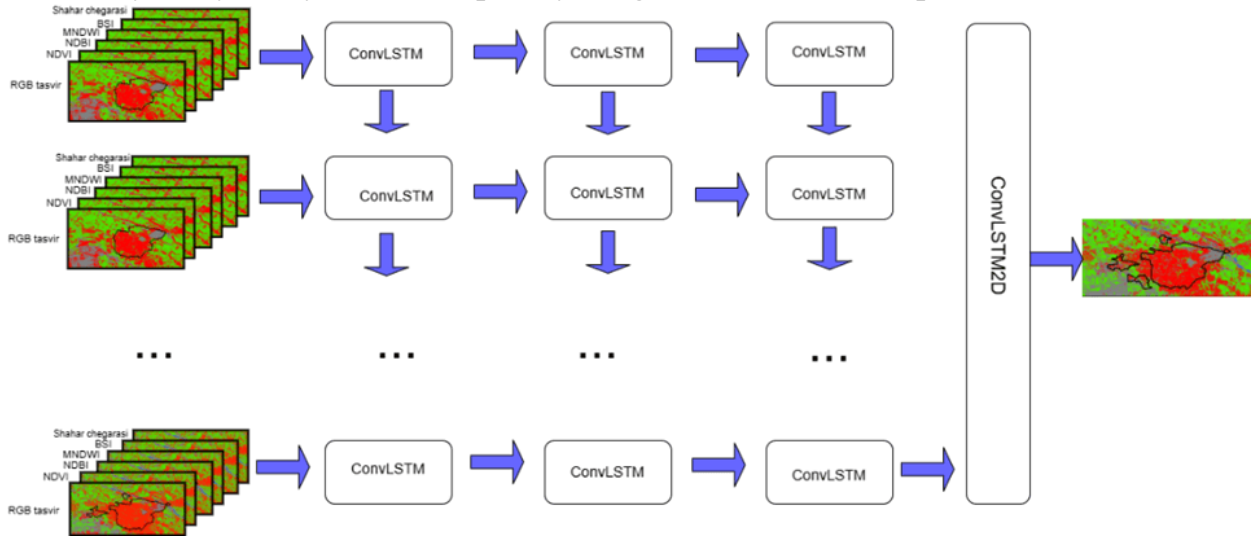
5. O'qitish va optimallashtirish

Yo'qotish funksiyasi aniqlangandan so'ng, model o'quv to'plamidagi xatoni minimallashtiruvchi **Adam** optimallashtirish algoritmlari yordamida o'qitildi.

6. Natija

1990 yildan 2022 yilgacha bo'lgan barcha tasvirlarda ConvLSTM o'qitilgandan so'ng, model 2023 yil uchun yer sirti qoplami tasviri yaratildi. Bu

tasvir o'tmishda sodir bo'lgan vaqt trendlari va fazoviy o'zgarishlarni hisobga oladi va 2023 yilda yer foydalanishi qanday o'zgarishini bashorat qiladi.



**4-rasm. ConvLSTM yordamida shahar hududiy o'zgarishini bashoratlash arxitekturas**

Shahar kengayishini bashorat qilish algoritmi quyidagi 5 ta qadamdan iborat:

**1-qadam.** Kirish ma'lumotlarini o'tgan yillar (1990-2022)dagi shahar tasvirlaridan tayyorlash:

$$X_{kirish} = \{X_t, X_{t+1}, \dots, X_{t+n}\}.$$

**2-qadam.** Kirish tasvirlarini o'lchamlarini 256x256 ga o'zgartirish va normalizatsiya qilish:

$$X_{normalizatsiya} = \frac{(X_{kirish} - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})}.$$

**3-qadam.** Tasvirlardan xususiyatlarni ajratib olish uchun *Canny* operator qo'llaniladi:

$$F = Canny(I_{normalizatsiya}, sigma).$$

**4-qadam.** Xususiyat kartalarini tayyorlash uchun vaqt qadamlari qo'llaniladi:

$$X = \{F_t, F_{t+1}, \dots, F_{t+n}\},$$

$$y = F_{t+n+1}.$$

**5-qadam.** ConvLSTM2D modeli o'rgatiladi va bashorat qilinadi:

$$h_t = ConvLSTM2D(X_t, h_{t-1}, C_{t-1}),$$

$$C_t = f(h_t, C_{t-1}),$$

$$y_{bashorat} = Conv2D(h_t).$$

Chuqur neyron tarmoqqa asoslangan shahar kengayishini bashoratlash o'zgarish algoritmi ishlab chiqildi.

Shahar o'sishni baholash uchun allometrik o'sish modelidan ham foydalanildi. Urbanizatsiya va shahar hududining kengayishini orqali baholandi.

$$U = k \cdot A^{\alpha},$$

bu yerda  $U$  - urbanizatsiya darajasi,  $A$  - shahar hududi maydoni,  $k$  - proporsionallik koeffitsiyenti,  $\alpha$  - allometrik eksponent, bu urbanizatsiya va shahar hududi o'rtasidagi o'sish munosabatini ko'rsatadi.



a)



b)



c)

**5-rasm. Samarqand viloyatining keyingi uch yildagi bashorat tasvir natijalari: a) 2024 yil b) 2025 yil c) 2026 yil**

2023 yilni shahar maydoning 1 km/kv ga qancha piksel to'g'ri kelishi aniqlab olinadi va mos ravishda keyingi yillar uchun shahar maydoni hisoblanadi. 2024-2026 yillardagi shahar maydoni topib olinadi.

Bunda bashorat qilingan keyingi uch yil uchun olindi. Unda urbanizatsiya darajasi va shahar hududining maydoni olindi.

**2-Jadval.**

**2024-2026 yillardagi bashorat qilingan urbanizatsiya darajasi va shahar hududi maydoni.**

Yil	Urbanizatsiya darajasi	Shahar o'lchami
2024	13.95	120.0
2025	14.01	120.5
2026	14.08	121.2

Shahar o'sishining allometrik eksponent  $\alpha = 0.923$  natija berdi.  $\alpha < 1$  bo'lgani va 1 ga yaqin bo'lgani uchun keyingi uch yillarda urbanizatsiya darajasi hududning kengayishiga nisbatan bir xil o'sishini bildiradi.

Dissertatsiyaning **“Urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlash uchun dasturiy majmuasi va tajribaviy-tadqiqotlar”** deb nomlangan to'rtinchi bobida urbanizatsiyani bashoratlash va shahar kengayishini baholash uchun ishlab chiqilgan modellar va dasturiy vositalar tavsiflangan hamda olingan natijalar tahlili keltirilgan.

Urbanizatsiyani bashoratlash masalasini yechishning dasturi va moduli ishlab chiqilgan. Bunda turli xil modellar qo'llanilganligi bayon etilgan va dasturning umumiy modeli tuzilmasi sxematik ko'rinishda tasvirlangan. Dasturiy majmua quyidagi imkoniyatlarga ega:

1. Turli xil mashinali o'qitish modellarini qo'llash;
2. Ma'lumotlarni tahlil qilish va vizuallashtirish;
3. Bashoratlash natijalarini olish va tahlil qilish.

Shahar kengayishini bashoratlash dasturi modullari ishlab chiqilgan. Bunda ConvLSTM arxitekturalarining qo'llanilishi va dastur modullari ko'rinishi sxematik tasvirlangan. Dastur quyidagi asosiy modullardan iborat:

1. Sun'iy yo'ldosh tasvirlarini qayta ishlash moduli;
2. ConvLSTM moduli;
3. Bashoratlash va vizuallashtirish moduli.

Hisoblash tajribasini o'tkazish va qiyosiy tahlil amalga oshirilgan. Urbanizatsiya darajasini bashoratlashda turli mashinali o'qitish modellari qo'llanildi va qiyosiy tahlil olib borildi. Samarqand viloyatining 2023 yilgi urbanizatsiya darajasi bashorat qilindi va Samarqand viloyatining haqiqiy urbanizatsiya darajasi bilan solishtirildi (3-jadval).

**3-jadval.**

**Bashorat qilingan urbanizatsiya darajasini qiyosiy tahlili.**

Modellar	Bashorat qilingan urbanizatsiya darajasi	Haqiqiy urbanizatsiya darajasi	Aniqlik darajasi
2023 yil uchun chiziqli regressiya	12.628%	13.908%	90.8%
2023 yil uchun qaror daraxti	13.032%	13.908%	93.7%
2023 yil uchun tasodifiy o'rmon	13.323%	13.908%	95.8%
2023 yil uchun SVM	13.171%	13.908%	94.7%
2023 yil uchun KNN	13.365%	13.908%	96.1%
2023 yil uchun XGBoost	13.129%	13.908%	94.4%
2024*			
2025*			
2026*			

\*2024-2026 yillar statistik ma'lumotlar mavjud bo'lmagani uchun haqiqiy urbanizatsiya darajasi va aniqlik darajasi hisoblanmadi.

Sun'iy yo'ldosh tasvirlari orqali shahar kengayishini bashorat qilish uchun chuqur o'qitish modellari qo'llanildi. Bunda ConvLSTM arxitekturasidan foydalangan holda amalga oshirildi. 2023 yilgi shahar chegarasi bashorat qilindi va qiyosiy tahlil olib borildi. Boshqa shahar hududiy kengayishini bashorat qiluvchi modellar bilan qiyosiy tahlil qilindi.

Tadqiqotda qo'llanilgan turli modellarning taqqoslash natijalari quyidagi jadvalda keltirilgan.

**4-jadval.**

**Modellar aniqligini baholash natijalari**

Modellar	Accuracy	MAE	RMSE	IoU
ConvLSTM	87.3%	0.087	0.097	0.88
Cellular Automata	86.7%	0.120	0.115	0.84
SLEUTH	78.0%	0.157	0.130	0.78
U-Net	79.0%	0.360	0.180	0.79

Olingan natijalar taklif etilgan modellarning urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashdagi yuqori samaradorligini ko'rsatdi. ConvLSTM modeli 87.3% aniqlik, MAE-0.087 MAE, RMSE-0.097 va IoU-0.88 bilan shahar hududining o'zgarishini yuqori aniqlikda bashorat qildi.

Umumiy natijalar shuni ko'rsatadiki, qo'llanilgan metodologiya Samarqand shahri misolida shahar hududiy kengayishini bashorat qilishda yuqori samaradorlikka ega. Bu yondashuv nafaqat shaharning umumiy kengayish tendensiyalarini, balki uning ichki tuzilishidagi o'zgarishlarni ham aniq aks ettirish imkonini berdi.

Bu natijalar shahar rejalashtirish, infratuzilmani rivojlantirish kabi bir qator sohalarda qo'llash mumkin. Shuningdek, bu metodologiya boshqa shaharlarga ham moslashtirilishi va qo'llash mumkin, bu esa keng miqyosda shaharlarning barqaror rivojlanishiga hissa qo'shadi.

## **XULOSA**

Dissertatsiyada urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlash va shahar kengayishini baholash uchun sun'iy intellektga asoslangan modellar va algoritmlar ishlab chiqildi. Tadqiqotni amalga oshirishdan olingan asosiy natijalar sifatida quyidagilarni qayd etish mumkin:

1. Urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlash va shahar kengayishini baholash bilan bog'liq bo'lgan tizimlarda qo'llaniladigan zamonaviy sun'iy intellekt usullari va algoritmlarining nazariy va amaliy jihatlarini yorituvchi ilmiy-texnik adabiyotlar tahlili amalga oshirildi. Bu urbanizatsiya ma'lumotlarini intellektual tahlil qilishda yangi yondashuvlar va gibrid algoritmlarni ishlab chiqish imkonini berdi. Shuningdek, mavjud usullarning afzalliklari va kamchiliklari aniqlandi.

2. Urbanizatsiya darajasini bashoratlash modelini qurishda mutual information va mashinaviy o'rgatish modellari asosida ishlab chiqish taklif etildi. Bu yondashuv bashoratlash samaradorligini sezilarli darajada oshirdi va ma'lumotlar o'rtasidagi bog'liqliklarni aniqroq baholash imkonini berdi.

3. Shahar kengayishini bashoratlash masalasini yechishda chuqur o'qitishga asoslangan ConvLSTM arxitektura qo'llanildi. Bu sun'iy yo'ldosh tasvirlaridan foydalanib shahar chegaralarini aniq bashoratlash imkonini berdi.

4. Urbanizatsiya darajasi va shahar hududi bo'yicha allometrik o'sish ham baholandi. Bunda keyingi yillarda urbanizatsiya darajasi hududning kengayishiga nisbatan bir xil o'sishi aniqlandi.

5. Urbanizatsiya darajasini bashoratlashda biz taklif etilgan modeli boshqa turli mashinali o'qitish modellari bilan qiyosiy tahlil qilindi. Bunda taklif etgan modeli samarali ekanligi aniqlandi.

6. Shahar kengayishini bashoratlash uchun suniy yo'ldosh tasvirlarini qayta ishlash va tahlil qilishning kompleks yondashuvi ishlab chiqildi. Bu yondashuv Landsat tasvirlarini yer sirti qoplamini tasvirlarga o'tkazish va ConvLSTM arxitekturalari yordamida bashoratlashni o'z ichiga oladi. Bunda biz taklif etgan modelimiz boshqa chuqur o'qitish modeliga nisbatan yaxshi ekanligi aniqlandi.

Ishlab chiqilgan modellar va algoritmlar Samarqand viloyatida sinovdan o'tkazildi. Bu esa shahar rejalashtirish va boshqaruvda muhim amaliy ahamiyatga ega bo'lib, shaharni rivojlantirish strategiyalarini ishlab chiqishda qo'llash mumkin.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.13/30.12.2021.Т.142.01**  
**ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАУЧНО-**  
**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ**  
**ТЕХНОЛОГИЙ И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

---

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

**ИСМАИЛОВ ИЛХОМ ТУРСУНБАЕВИЧ**

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В**  
**ПРОГНОЗИРОВАНИИ УРБАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

05.01.11 – Цифровые технологии и искусственный интеллект

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

**Ташкент– 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2023.4.PhD/T4193.

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

Автореферат диссертации размещен на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) на веб-сайте Ученого совета ([www.airi.uz](http://www.airi.uz)) и на информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:** Мухамедиева Дилдора Кабиловна  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** Рустамов Насим Тулегенович  
доктор технических наук, профессор

Юсупов Озод Раббимович  
доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент

**Ведущая организация:** Нукусский филиал Ташкентского университета  
информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми.

Защита диссертации состоится на заседании Научного совета DSc.13/30.12.2021.T.142.01 при Научно-исследовательском институте цифровых технологий и искусственного интеллекта «21» февраля 2025 года в 16<sup>00</sup> часов (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо-Улугбекский район, массив Боз-2, дом 17-А. Тел.: (99871) 2634198).

С диссертационной работой можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Научно-исследовательского института цифровых технологий и искусственного интеллекта (регистрационный номер №54) (Адрес: 100125, г. Ташкент, Мирзо-Улугбекский район, массив Боз-2, дом 17-А. Тел.: (99871) 2634198).

Автореферат диссертации разослан «8» февраля 2025 года.  
(реестр протокола рассылки № 1 от «16» января 2025 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

**Р.Х. Хамдамов**  
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 настоящее время в различных странах мира наблюдается стремительный рост городов и ускорение процессов урбанизации. Этот процесс оказывает двойное влияние. С одной стороны, он создает возможности для экономического развития и улучшения качества жизни населения. С другой стороны, он может привести к различным проблемам. К этим проблемам относятся загрязнение окружающей среды и ухудшение экологической ситуации, транспортные заторы и чрезмерная нагрузка на инфраструктуру, нехватка жилья и рост цен. Кроме того, процессы урбанизации могут привести к усилению социального неравенства, опустошению сельских территорий, росту уровня преступности в городах и негативному влиянию на здоровье городского населения. Поэтому важное значение имеет правильное прогнозирование развития городов и моделирование процессов урбанизации. Это позволяет не только эффективно использовать позитивные возможности, но и предвидеть вышеперечисленные негативные последствия и принимать меры по их предотвращению.

В настоящее время в мире разработаны и используются различные программное обеспечение и технологии искусственного интеллекта для прогнозирования и моделирования процессов урбанизации. Например, в Китае, Соединенных Штатах Америки, Великобритании, Германии, Франции, Южной Корее, Индии и других развитых странах такие задачи, как прогнозирование разрастания городов, оптимизация транспортных потоков, развитие инфраструктуры, решаются с помощью искусственного интеллекта. Используются системы искусственного интеллекта, методы математического моделирования и машинного обучения. Однако существующие решения не в полной мере адаптированы к условиям развивающихся стран и не учитывают местные особенности. В развивающихся странах при прогнозировании процессов урбанизации в основном применяются традиционные методы, основанные на статистических данных. Методы интеллектуального моделирования не используются. Также недостаточно учитываются факторы, характерные для этих стран, в том числе уровень инфраструктуры, финансовые возможности, темпы урбанизации и социально-экономические особенности. Кроме того, решения на основе искусственного интеллекта могут оказаться дорогими и сложными для развивающихся стран.

Перед нашей республикой также стоят такие актуальные задачи, как разрастание городов, повышение качества обслуживания населения, оптимизация транспортных потоков, обеспечение социально-экономического развития. Процессы урбанизации в нашей стране имеют свои особенности и отличаются от процессов в развитых странах. Поэтому одной из актуальных задач является разработка новых моделей и алгоритмов на основе искусственного интеллекта для прогнозирования процессов урбанизации и исследование проблем их применения в условиях развивающейся страны.

Указы Президента Республики Узбекистан УП-5623 «О мерах по коренному совершенствованию процессов урбанизации», УП-6079 «О стратегии “Цифровой Узбекистан – 2030”» и УП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», а также постановления ПП-4996 «О

мерах по созданию условий для ускоренного внедрения технологий искусственного интеллекта», ПП-200 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы образования в сфере информационных технологий и усилению подготовки квалифицированных кадров» и ПП-404 «О мерах по развитию социальной и производственной инфраструктуры Республики Узбекистан на 2024-2026 годы» определяют важные задачи по совершенствованию процессов урбанизации, внедрению технологий искусственного интеллекта, ускорению цифровой трансформации и развитию инфраструктуры. Реализация этих нормативных документов служит решению вопросов использования искусственного интеллекта при прогнозировании процессов урбанизации в нашей стране. Также данное диссертационное исследование охватывает именно эти актуальные проблемы и направлено на освещение вопросов использования искусственного интеллекта при прогнозировании процессов урбанизации, а результаты исследования будут в определенной степени способствовать решению существующих проблем в этой области путем разработки моделей и алгоритмов на основе искусственного интеллекта, соответствующих условиям нашей страны, и их внедрению в практику.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в рамках приоритетного направления IV. «Информатизация и развитие информационно-коммуникационных технологий» развития науки и технологий республики.

**Степень изученности проблемы.** Исследования мировых ученых в области прогнозирования и анализа процессов урбанизации включают широкомасштабные исследования. В частности, такие зарубежные ученые, как Минсин Чэнь, Дэвид Саттертуэйт, Махер Милад Абурас, Анасуа Чакраборти, Майкл Батти, Карен Сето, Сюэцао Ли и Чже Чу ведут научные работы в этой области. Они разрабатывают эффективные решения по определению факторов урбанизации, глубокому анализу данных и прогнозированию будущих состояний, используя различные методы искусственного интеллекта, такие как алгоритмы машинного обучения, глубокие нейронные сети и модели линейной регрессии.

В исследованиях используются различные источники и данные, такие как спутниковые снимки, статистические показатели и локальные базы данных. Глубокий анализ этих данных и выявление дополнительных приоритетных факторов позволяет создать комплексную модель процессов урбанизации. Разработанные зарубежными учеными модели на основе искусственного интеллекта направлены на решение актуальных задач, таких как прогнозирование роста городов в будущем, создание экономической транспортной инфраструктуры, строительство жилья и социальной инфраструктуры в соответствии с потребностями населения.

В Узбекистане исследования в области интеллектуального анализа данных и искусственного интеллекта, проводимые такими учеными, как М.М. Камиллов, Т.Ф. Бекмуродов, Ш.Х. Фозилов, Н. Мирзаев, Д.Т. Мухамедиева, Н.С. Маматов, С.С. Раджабов и Д.К. Мухамедиева, также служат важной

теоретической и практической основой для данной диссертационной работы. Учеными проводятся исследования по развитию искусственных нейронных сетей, методов машинного обучения, моделирования и других технологий искусственного интеллекта.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Исследовательская работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов БВ-В-Ф4-011 «Методы и алгоритмы решения нечетко-некорректных задач интеллектуального анализа данных в условиях неопределенности» (2017-2020) в соответствии с планом научно-исследовательских работ Научно-инновационного центра информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразмий.

**Цель исследования** состоит в разработке моделей и алгоритмов прогнозирования уровня урбанизации на основе статистических данных, связанных с процессами урбанизации, и изменений территорий на основе спутниковых снимков.

**Задачи исследования:**

изучение прогнозирования процессов урбанизации и анализ влияющих на них факторов;

разработка модели прогнозирования уровня урбанизации на основе сокращения пространства признаков с применением метода измерения взаимосвязи между двумя случайными величинами;

совершенствование алгоритма преобразования спутниковых снимков в изображения земной поверхности с применением метода машинного обучения;

разработка подхода к уменьшению размерности изображений земного покрова на основе метода главных компонент;

разработка архитектуры оценки изменения городской территории на основе глубоких нейронных сетей для прогнозирования разрастания городов;

разработка программного обеспечения на основе существующих и предложенных алгоритмов, проведение экспериментов и сравнительного анализа на основе полученных результатов.

**Объектом исследования** являются связанные с многочисленными признаками процессы, касающиеся прогнозирования уровня урбанизации и изменений территорий на основе спутниковых снимков.

**Предмет исследования** состоит в прогнозировании уровня урбанизации на основе статистических данных и разработке методов, алгоритмов и программного обеспечения для территориального разрастания городов на основе спутниковых снимков.

**Методы исследования.** Теоретические исследования диссертационной работы основаны на математическом анализе, статистическом анализе, системном анализе, машинном обучении, глубоком обучении, распознавании изображений и компьютерной модели классификации процессов.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана модель прогнозирования уровня урбанизации на основе сокращения пространства признаков с использованием метода измерения взаимосвязи между двумя случайными величинами;

усовершенствован алгоритм преобразования в изображения земной поверхности с использованием метода машинного обучения на основе спутниковых снимков;

разработан подход к уменьшению размерности изображений земной поверхности на основе метода главных компонент;

разработана архитектура оценки изменения городских территорий на основе глубоких нейронных сетей для прогнозирования разрастания городов.

#### **Практические результаты исследования:**

на основе алгоритмов прогнозирования уровня урбанизации рассчитаны прогнозных значений уровня урбанизации на ближайшие 3 года на примере Самаркандской области;

разработаны программные модули для моделей и алгоритмов прогнозирования уровня урбанизации и изменения территорий.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность полученных в ходе исследования результатов обеспечена интеллектуальным анализом, моделированием конкретных ситуаций и практическими испытаниями в прикладных областях. Адекватность модели проверена на реальных данных и в экспериментальных испытаниях, также проведен сравнительный анализ с другими решениями. Таким образом, было подтверждено, что созданные модель и алгоритм могут обеспечить достоверные результаты при прогнозировании урбанизации.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость диссертационного исследования заключается в разработке новых моделей и алгоритмов, основанных на искусственном интеллекте для прогнозирования урбанизационных процессов. Созданные модели и алгоритмы позволяют анализировать факторы урбанизации в условиях неопределенности, обрабатывать данные и делать точные прогнозы. Результаты исследования будут полезны при решении таких актуальных задач, как прогнозирование развития городов в будущем, планирование транспортной и социальной инфраструктур. Разработанные решения могут использоваться для поддержки принятия решений в системах городского управления.

Практическая значимость исследования объясняется возможностью прогнозирования территориального разрастания городов и мониторинга урбанизационных процессов посредством созданных программных продуктов. Эти программные средства могут использоваться городскими архитекторами, дорожными строителями, транспортными инженерами и другими специалистами. В результате повысится качество градостроительных проектов и улучшится уровень жизни населения.

**Внедрение результатов исследования.** Научные результаты, разработанные на основе моделей и алгоритмов прогнозирования уровня урбанизации и изменений территорий:

Модель прогнозирования изменений территорий на основе архитектуры рекуррентной нейронной сети внедрена в «Центре развития ИКТ» при хокимияте Самаркандской области для планирования архитектурных проектов в городе Самарканде (Справка хокимията Самаркандской области Республики Узбекистан от 2 мая 2024 года № 02-02/240). В результате удалось повысить производительность работы по планированию городских архитектурных проектов.

алгоритмы прогнозирования уровня урбанизации для моделей прогнозирования с использованием малых обучающих выборок, основанных на стратегии локального весового сглаживания и уменьшения признакового пространства на основе взаимного информационного измерения применены в Управлении статистики Самаркандской области для определения тенденций развития населенных пунктов (Справка хокимията Самаркандской области Республики Узбекистан от 2 мая 2024 года № 02-02/240). В результате удалось сократить время разработки инфраструктурных проектов и повысить точность прогнозирования.

Алгоритм преобразования в изображения земной поверхности земли на основе спутниковых снимков и модель прогнозирования изменений территорий на основе архитектуры сверточной рекуррентной нейронной сети внедрены в Самаркандском городском филиале Палаты государственных кадастров для актуализации кадастровых данных (Справка хокимията Самаркандской области Республики Узбекистан от 2 мая 2024 года № 02-02/240). В результате удалось повысить эффективность работы по обновлению кадастровых данных.

**Апробация результатов исследования.** Основные теоретические и практические результаты диссертации обсуждались на 8 международных и 1 республиканской научно-практической конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** Основные результаты исследования опубликованы в 14 научных работах, 6 из которых опубликованы в научных изданиях, рекомендованных к публикации Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан в качестве основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 3 – в зарубежных и 3 – в республиканских журналах. Также получены 2 свидетельства о регистрации программных средств для ЭВМ от Агентства интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции Республики Узбекистан.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 112 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** обосновываются актуальность и востребованность темы диссертационной работы, описываются цели и задачи, объект и предмет исследования, указывается его соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, описываются научная новизна и практические результаты исследования, раскрывается теоретическое и практическое значение полученных результатов, приводятся

сведения о внедрении результатов исследования, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной **«Аналитический анализ решения задачи прогнозирования урбанизации»**, анализируются существующие методы, проблемы и подходы к прогнозированию и моделированию процессов урбанизации. Подчеркивается сложность прогнозирования процессов урбанизации в силу их комплексности, многофакторности и динамической природы. Излагаются преимущества и недостатки существующих подходов. В частности, освещаются проблемы, связанные с качеством, полнотой и достоверностью данных, сложностью моделей, необходимостью учета факторов неопределенности и случайности. Обоснована необходимость применения современных информационных технологий и методов искусственного интеллекта для решения этих проблем.

Наряду с этим, в первой главе диссертации анализируются различные модели прогнозирования процессов урбанизации, где подробно освещается применение логистической модели роста для отражения тенденций роста городов с течением времени, возможность клеточных автоматов моделировать градостроительные изменения в пространстве, способность агентных моделей имитировать поведение городского населения, вероятностное отражение изменений состояний урбанизации с помощью цепей Маркова, эффективность нейронных сетей в изучении сложных нелинейностей, полезность геопространственных моделей в интеграции пространственных данных и возможность гибридных моделей объединять преимущества вышеуказанных подходов, а также анализируются возможности и ограничения каждой модели. На основе сравнения моделей определены области и условия их применения.

Кроме того, при прогнозировании процессов урбанизации основное внимание уделяется трем важным задачам: в первой задаче рассматривается прогнозирование изменения уровня урбанизации во времени, во второй задаче предлагается метод прогнозирования площади городской территории с использованием глубоких нейронных сетей, в третьей задаче применяется модель аллометрического роста для изучения взаимосвязи между уровнем урбанизации и площадью городской территории. Решение этих задач обеспечивает возможность комплексной оценки будущего развития городов и принятия эффективных градостроительных решений.

Во второй главе диссертации, озаглавленной **«Модели и алгоритмы прогнозирования уровня урбанизации на основе искусственного интеллекта»**, приводится описание предметной области.

В части определения факторов, влияющих на прогнозирование урбанизации, были изучены демографические, социальные, экономические и инфраструктурные признаки. Эти показатели рассматривались как основные признаки при прогнозировании уровня урбанизации. Из-за большого количества признаков возникла задача их сокращения, и был разработан алгоритм сокращения пространства признаков на основе взаимной информации (Mutual Information, MI).

Ниже приводится алгоритм отбора признаков, влияющих на уровень урбанизации, на основе  $MI$ .

**Шаг 1.** Ввод признаков  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  и значений ответов (меток) ( $Y$ ).

Ввод осуществляется в следующей форме

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,m} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,m} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix},$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_m$  - вектор, представляющий признаки.

**Шаг 2.** Обеспечение значения  $X' = \emptyset$ .

**Шаг 3.** Вычисление меры  $MI$ :

$$I(x_j; Y) = \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^m P(x_j, y_l) \log \frac{P(x_j, y_l)}{P(x_j)P(y_l)},$$

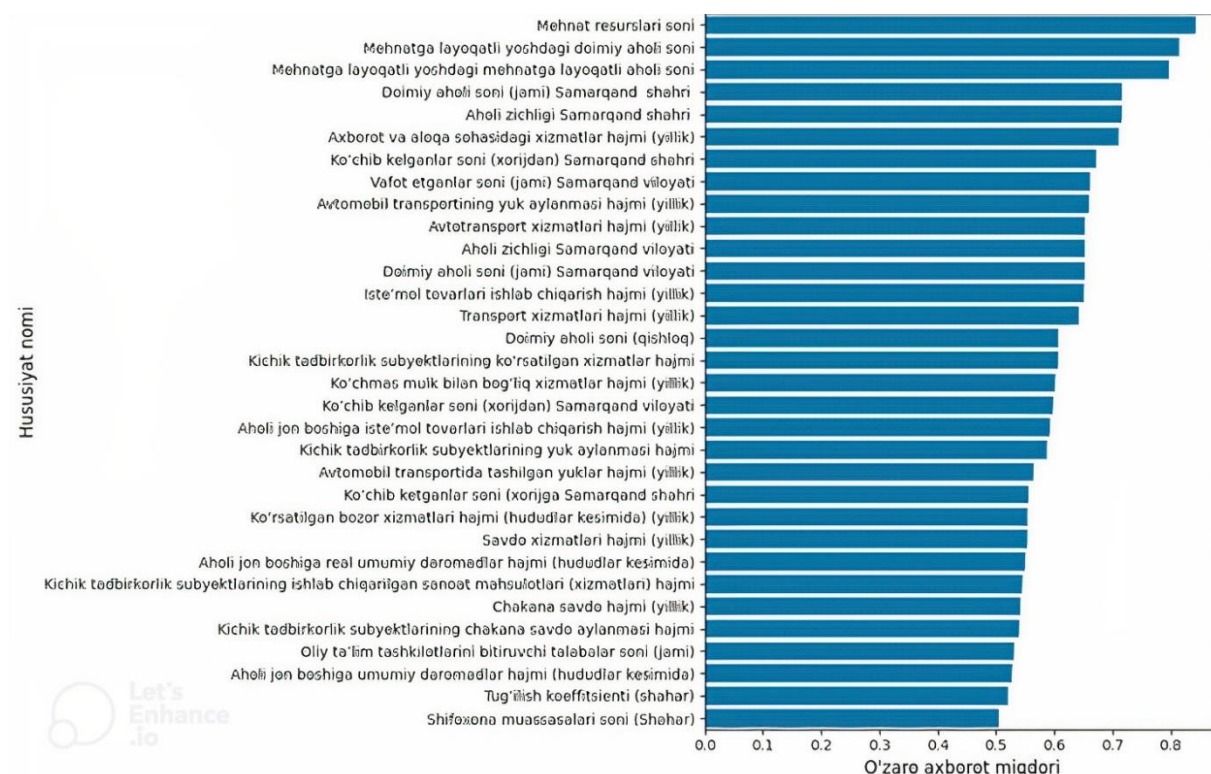
где  $P(x_j, y)$  - совместная вероятность между  $x_j$  и  $y$ ,  $P(x_j)$  - совместная вероятность  $x_j$ ,  $P(y)$  - совместная вероятность  $y$ .

**Шаг 4.** Отбор признаков по величине меры  $MI$ . Проверка условия  $MI_j > \delta$  для каждого признака. Если условие выполняется, признак  $x_j$  включается в набор признаков  $X'$ .

**Шаг 5.** Завершение алгоритма.

На основе алгоритма, разработанного по данным официального сайта Агентства статистики при Президенте Республики Узбекистан ([www.stat.uz](http://www.stat.uz)), было осуществлено сокращение 131 признака, влияющего на урбанизацию. В алгоритме было выбрано значение  $\delta = 0.5$ , в результате выполнения алгоритма с этим значением пространство признаков было сокращено до 32 признаков. На рисунке 1 представлены признаки, удовлетворяющие условию. Матрица новых 32 выбранных признаков приняла следующий вид:

$$X_{32} = \begin{bmatrix} x_{1,(1)} & x_{1,(2)} & L & x_{1,(32)} \\ x_{2,(1)} & x_{2,(2)} & L & x_{2,(32)} \\ L & L & O & L \\ x_{n,(1)} & x_{n,(2)} & L & x_{n,(32)} \end{bmatrix}.$$



**Рис. 1. Информативные символы, отобранные на основе алгоритма сокращения пространства признаков с использованием МП**

Для прогнозирования уровня урбанизации был применен алгоритм машинного обучения К-ближайших соседей (K-Nearest Neighbors, KNN). Этот алгоритм осуществляет прогнозирование на основе схожести факторов, влияющих на урбанизацию, при этом прогнозируемое значение определялось на основе «к» ближайших соседних значений.

В исследовании изучаются уровень урбанизации и 32 фактора, влияющих на него. В связи с небольшим объемом данных, для повышения точности прогноза модель KNN применялась совместно с подходом локально взвешенной регрессии (Locally Weighted Scatterplot Smoothing, LOWESS).

LOWESS используется для сглаживания данных временных рядов и выявления сложных закономерностей с помощью локальной регрессии. Сглаженные значения, полученные с помощью LOWESS, служат дополнительными переменными для модели KNN.

LOWESS сглаживание и прогнозирование временных рядов осуществляется в следующих этапах:

- 1-этап. Подготавливаются исходные данные.
- 2-этап. Временные ряды сглаживаются с помощью LOWESS.
- 3-этап. Сглаженные значения добавляются к основным данным.
- 4-этап. Строится модель KNN.
- 5-этап. Прогнозируется уровень урбанизации.

Алгоритм прогнозирования уровня урбанизации состоит из следующих шагов.

**Шаг 1.** Ввод обучающей выборки  $X^l$ .

**Шаг 2.** Установка начальных значений коэффициентов  $\gamma_i = 1$ ; ( $i = 1, \dots, l$ ;) )

**Шаг 3.** Вычисление скользящей контрольной оценки для каждого объекта обучающей выборки ( $i = 1, \dots, l$ ;) )



$$a_i := a_h(x_i; X^l \setminus \{x_i\}) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^l y_j \gamma_j K\left(\frac{\rho(x_i, x_j)}{h(x_i)}\right)}{\sum_{j=1, j \neq i}^l \gamma_j K\left(\frac{\rho(x_i, x_j)}{h(x_i)}\right)},$$

$$\varepsilon_i = |a_h(x_i; X^l \setminus \{x_i\}) - y_i|.$$

**Шаг 4.** Вычисление новых значений коэффициентов  $\gamma_i$  для каждого объекта обучающей выборки ( $i = 1, \dots, l$ ):

$$\gamma_i := \tilde{K}(|a_i - y_i|),$$

где  $\tilde{K}(|a_i - y_i|) = K_Q\left(\frac{|a_i - y_i|}{6 \cdot \text{med}\{\varepsilon_i\}}\right)$ , -функция ядра,  $\text{med}\{\varepsilon_i\}$  - значение медианы вариационного ряда ошибок,  $K_Q$  - квадратичная ядерная функция.

**Шаг 5.** Проверка коэффициентов  $\gamma_i$  на устойчивость. Если коэффициенты устойчивы, осуществляется переход к следующему шагу, в противном случае – возврат к шагу 3.

**Шаг 6.** Завершение алгоритма.

На основе обучения алгоритма определяются коэффициенты  $\gamma_i$  а алгоритма. При этом использовалась гауссова ядерная функция

$$K\left(\frac{\rho(x_i, x_j)}{h(x_i)}\right) = \exp\left(-2\left(\frac{\rho(x_i, x_j)}{h(x_i)}\right)^2\right).$$

На основе данного алгоритма прогнозируется уровень урбанизации на ближайшие три года (таблица 1).

**таблица 1.**

Результаты прогнозирования уровня урбанизации на следующие 3 года на основе модели KNN

Годы	Прогнозируемый уровень урбанизации
2024	13.955564%
2025	14.006889%
2026	14.084194%

В третьей главе диссертации, озаглавленной «**Модели и алгоритмы решения задачи прогнозирования территориального разрастания города**», разработаны несколько алгоритмов для прогнозирования территориального разрастания города в условиях урбанизации. Цифровая обработка изображений, полученных с Landsat, состоит из следующих этапов.

**Шаг 1.** Определение области интереса (ROI - Region of Interest). Выражение для определения области  $\Omega$ :

$$\Omega = \{(x, y) | x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2\},$$

где  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  - координаты, представляющие форму прямоугольника.

**Шаг 2.** Формирование набора временных периодов для дистанционно полученных изображений:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, \quad t_i = t_1 + i \cdot \Delta t.$$

**Шаг 3.** Формирование набора изображений дистанционного зондирования по 7 каналам на основе временного набора  $T$ :

$$L^t = \{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7\},$$

где  $B_1$ : невидимая синяя сеть;  $B_2$ : синий;  $B_3$ : зеленый;  $B_4$ : красный;  $B_5$ : инфракрасный;  $B_6$ : коротковолновый инфракрасный (Shortwave Infrared 1, SWIR1);  $B_7$ : коротковолновый инфракрасный (Shortwave Infrared 2, SWIR2).

**Шаг 4.** Обработка помех от облаков и снега. В спектральных каналах выявляются помехи от облаков и снега, и область помех удаляется из изображения:

$$I(x, y) = I(x, y) \cdot Mask_{binar}(x, y),$$

где  $Mask_{binar} = \begin{cases} 0, & \text{если пиксель не является круглым,} \\ 1, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$

**Шаг 5.** Расчет индексов по спектральным каналам. Расчет спектральных индексов для определения типа поверхностного покрова земли:

$$NDVI = \frac{B_5 - B_4}{B_5 + B_4},$$

$$NDBI = \frac{B_6 - B_5}{B_6 + B_5},$$

$$MNDWI = \frac{B_3 - B_6}{B_3 + B_6},$$

$$BSI = \frac{(B_6 + B_4) - (B_5 + B_2)}{(B_6 + B_4) + (B_5 + B_2)},$$

где NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – для растительного покрова. NDBI (Normalized Difference Built-up Index) - для застроенных или антропогенных территорий. MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) - для водных территорий. BSI (Bare Soil Index) - для пустых или открытых земель. BSI используется для определения открытой почвы или поверхности земли.

**Шаг 6.** Сбор обучающих образцов. Для различения типов поверхностного покрова земли собираются обучающие характеристики, соответствующие каждому типу.

Набор характеристик представим следующим образом:

$$X = \{NDVI, NDBI, MNDWI, BSI\}.$$

Определение типа поверхностного покрова земли ( $Y$ ):

$$Y = \{0, 1, 2, 3, 4\},$$

где 0: Граница города (черный), 1: застроенная территория (красный), 2: Растительность (зеленый), 3: Вода (синий), 4: пустые земли (серый)

**Шаг 7.** Обучение модели случайного леса для классификации. Связь обучающих характеристик и типа поверхностного покрова земли представим следующим образом:

$$f(X) = RandomForest(X).$$

Этот алгоритм работает по  $m$  деревьям  $(T_1, T_2, \dots, T_m)$ :

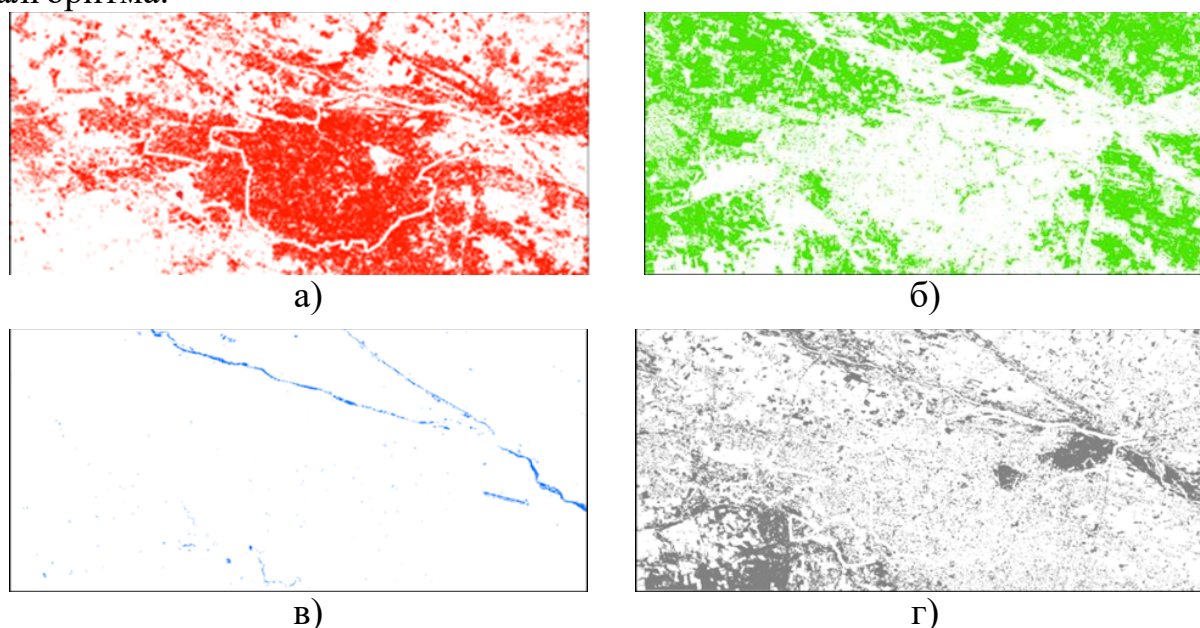
$$f(X) = Q\{T_1(X), T_2(X), \dots, T_m(X)\}.$$

**Шаг 8.** Создание изображений поверхностного покрова земли. Для каждого пикселя рассчитываются спектральные индексы и через классификатор определяется тип поверхностного покрова земли:

$$Yer\_qoplami(x, y) = f(X(x, y)).$$

Визуализация результатов: Результаты классификации представлены в виде цветной карты, что позволяет легко различать различные типы поверхностного покрова земли. На основе данного алгоритма формируются выборки (обучающая и контрольная).

На рисунке 2 представлены результаты применения предложенного алгоритма.



**Рис. 2. Результаты применения алгоритма к данным дистанционных каналов Самаркандской области, полученным в 2022 году: а) NDBI; б) NDVI в) MNDWI г) BSI**

С целью повышения эффективности анализа было проведено сокращение признаков пространства изображений поверхностного покрова земли с помощью метода анализа главных компонент. Полученный в результате этого процесса компактный, но информативный набор данных позволил эффективно обучить модель глубокого обучения.

**Шаг 1.** Подготовка данных. Изображения поверхностного покрова земли представляются в виде матрицы  $X$ , где каждый столбец представляет один пиксель, а каждая строка - спектральный канал.

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_N],$$

где  $N$  – количество пикселей.

**Шаг 2.** Стандартизация данных:

$$\bar{X} = X - \mu,$$

где  $\mu$  – вектор средних значений для каждого канала.

**Шаг 3.** Вычисление ковариационной матрицы.

$$C = \frac{1}{n-1} * \bar{X}^T * \bar{X},$$

**Шаг 4: Вычисление собственных значений и собственных векторов.** Для ковариационной матрицы  $C$  находятся собственные значения и собственные векторы:

$$C * v = \lambda * v,$$

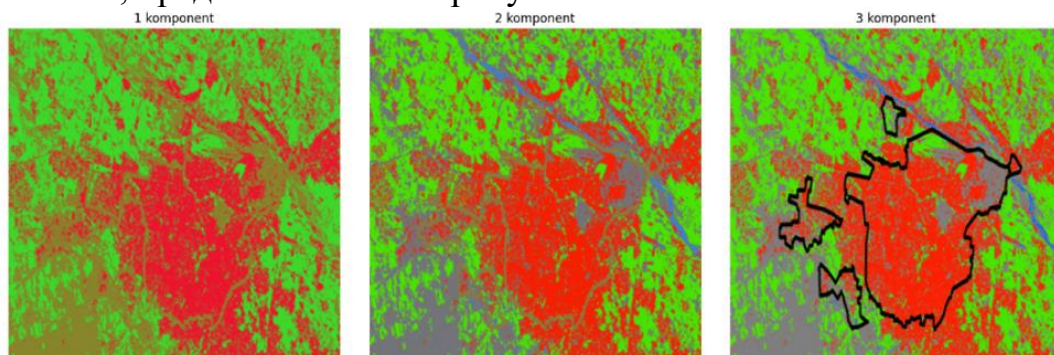
где  $\lambda$  – собственные значения,  $v$  – собственные векторы.

**Шаг 5. Выбор главных компонент.** Сортируем собственные значения в порядке убывания и выбираем собственные векторы, соответствующие  $k$  наибольшим собственным значениям. Эти векторы образуют проекционную матрицу  $W$ .

**Шаг 6: Проецирование данных:**

$$Y = W^T \times \bar{X},$$

где  $Y$  – данные уменьшенной размерности. В результате получаются изображения, представленные на рисунке 3.



**Рис. 3. Уменьшение признакового пространства изображений поверхностного покрова земли на основе анализа главных компонент**

Изображения поверхностного покрова земли, обработанные методом анализа главных компонент, показали важные результаты. Изображения разделены на 3 основных компонента, причем в первом компоненте сохранено наибольшее количество информации, и основные классы земного покрова четко разделены. Во втором компоненте сохранено немного меньше информации, но основные классы все еще хорошо видны. В третьем компоненте сохранено наименьшее количество информации, и городская территория, ограниченная черными линиями, четко выражена. Эти изображения, обработанные методом анализа главных компонент, служат качественными входными данными для алгоритма ConvLSTM, так как в них четко показаны границы городской территории и динамика изменений. Это позволяет более точно прогнозировать будущее территориальное расширение города с помощью ConvLSTM. В результате удалось уменьшить объем данных за счет главных компонент, сохранив при этом характеристики основных классов поверхностного покрова земли.

Для прогнозирования разрастания городов использовались архитектуры ConvLSTM.

Прогнозирование изображений поверхностного покрова земли с помощью ConvLSTM на основе временных последовательностей представляет собой процесс прогнозирования будущих состояний системы с использованием сверточных рекуррентных нейронных сетей (ConvLSTM), основанный на временной динамике пространственных данных. У нас имеется

720 изображений поверхностного покрова земли за период с 1990 по 2022 год, и мы используем эти данные для прогнозирования поверхностного покрова земли на 2023 год.

### 1. Представление данных

Наши данные о поверхностном покрове земли с 1990 по 2022 год представляем в виде четырехмерного тензора:

$$X \in R^{T \times H \times W \times C},$$

где  $T = 720$  - количество временных шагов (изображений),  $H$  - высота каждого изображения (количество пикселей по вертикали),  $W$  - ширина каждого изображения (количество пикселей по горизонтали),  $C$  - количество каналов (в нашем случае RGB изображения,  $C = 3$ ).

### 2. ConvLSTM: Слой модели

ConvLSTM (Сверточная Долгая Краткосрочная Память) - это расширенный вариант стандартного LSTM для работы с пространственными данными, где операции над состояниями и входами выполняются посредством сверток. Это позволяет учитывать как временные зависимости, так и пространственные взаимосвязи между пикселями изображений.

Основной вид ConvLSTM выглядит следующим образом:

На каждом временном шаге  $t$  ConvLSTM обновляет свое состояние, используя следующие выражения:

Вентиль забывания  $f_t$  (определяет, какую информацию нужно забыть):

$$f_t = \sigma(W_f * X_t + U_f * h_{t-1} + V_f \odot C_{t-1} + b_f).$$

Входной вентиль  $i_t$  (определяет, какую новую информацию нужно сохранить):

$$i_t = \sigma(W_i * X_t + U_i * h_{t-1} + V_i \odot C_{t-1} + b_i).$$

Кандидат нового состояния ячейки  $\tilde{C}_t$ :

$$\tilde{C} = \tanh(W_c * X_t + U_c * h_{t-1} + b_c).$$

Обновление состояния ячейки:

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t.$$

Выходной вентиль  $o_t$  (решает, какую часть состояния передать на выход):

$$o_t = \sigma(W_o * X_t + U_o * h_{t-1} + V_o \odot C_t + b_o).$$

Обновление скрытого состояния:

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t).$$

где  $X_t$  - входное изображение на временном шаге  $t$ ,  $h_{t-1}$  - скрытое состояние на предыдущем временном шаге,  $C_{t-1}$  - состояние памяти на предыдущем временном шаге,  $f_t$  - вентиль забывания, определяющий степень забывания предыдущей информации,  $i_t$  - входной вентиль, определяющий степень сохранения новой информации,  $\tilde{C}_t$  - новое потенциальное состояние памяти,  $C_t$  - обновленное состояние памяти,  $o_t$  - выходной вентиль, определяющий влияние на новое скрытое состояние,  $h_t$  - обновленное скрытое состояние,  $W_f$ ,  $W_i$ ,  $W_c$ ,  $W_o$  - сверточные ядра (фильтры) - веса, получаемые из входных изображений ( $X_t$ ),  $U_f$ ,  $U_i$ ,  $U_c$ ,  $U_o$  - сверточные ядра - веса, получаемые из

предыдущего скрытого состояния ( $H_{t-1}$ ),  $V_f$ ,  $V_i$ ,  $V_o$ -веса, связанные с памятью ( $C_t$ ),  $b_f$ ,  $b_i$ ,  $b_c$ ,  $b_o$ -смещения – дополнительные параметры настройки в нейронной сети,  $\sigma$ - сигмоидная функция активации,  $\tanh$  - гиперболический тангенс функция активации и  $e$  - поэлементное умножение.

3. Прогнозирование временных рядов земного покрова выполняется следующими этапами.

**Шаг 1.** Подготовка данных. Данные поверхностного покрова земли имеют временную последовательность из 720 изображений, где каждое изображение представляет состояние землепользования в определенный момент времени. Для обучения модели данные были организованы в сегменты длиной  $n$ .

Для  $n$  вводятся сегменты временной длительностью 10 лет:

$$[X_{t-9}, X_{t-8}, \dots, X_t].$$

**Шаг 2.** Прогнозирование поверхностного покрова земли на 2023 год.

Модель ConvLSTM обучается на последовательностях данных с 1990 по 2022 год. После обучения модель использует последние  $n$  лет в качестве входных данных для прогнозирования изображения поверхностного покрова земли на 2023 год.

Процесс прогнозирования можно представить следующим образом: для временной последовательности  $\{X_{1990}, X_{1991}, \dots, X_{2022}\}$  вводятся последние  $n$  изображений:

$$X = \{X_{1990}, X_{1991}, \dots, X_{2022}\}.$$

Модель ConvLSTM прогнозирует следующее состояние  $\hat{X}_{2023}$ , используя временные и пространственные зависимости, полученные из последовательности предыдущих лет.

4. Функция потерь.

Для обучения модели используется функция потерь, которая измеряет разницу между прогнозируемыми изображениями и реальными изображениями поверхностного покрова земли. Одна из функций потерь, используемых в этой работе - это среднеквадратичная ошибка (**MSE**):

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_t^{(i)} - \hat{X}_t^{(i)})^2,$$

где  $X_t^{(i)}$  - реальное значение  $i$  - пикселя во время  $t$ ,  $\hat{X}_t^{(i)}$  - прогнозное значение  $i$ -пикселя во время  $t$ .  $N$  - количество пикселей в изображении.

5. Обучение и оптимизация

После определения функции потерь модель была обучена с помощью алгоритма оптимизации Adam, минимизирующего ошибку на обучающем наборе.

6. Результат

Полученные изображения земного покрова на 2023 год были созданы после обучения ConvLSTM на всех изображениях с 1990 по 2022 год. Это изображение учитывает временные тренды и пространственные изменения, произошедшие в прошлом, и прогнозирует, как изменится землепользование в 2023 году (рисю 4).

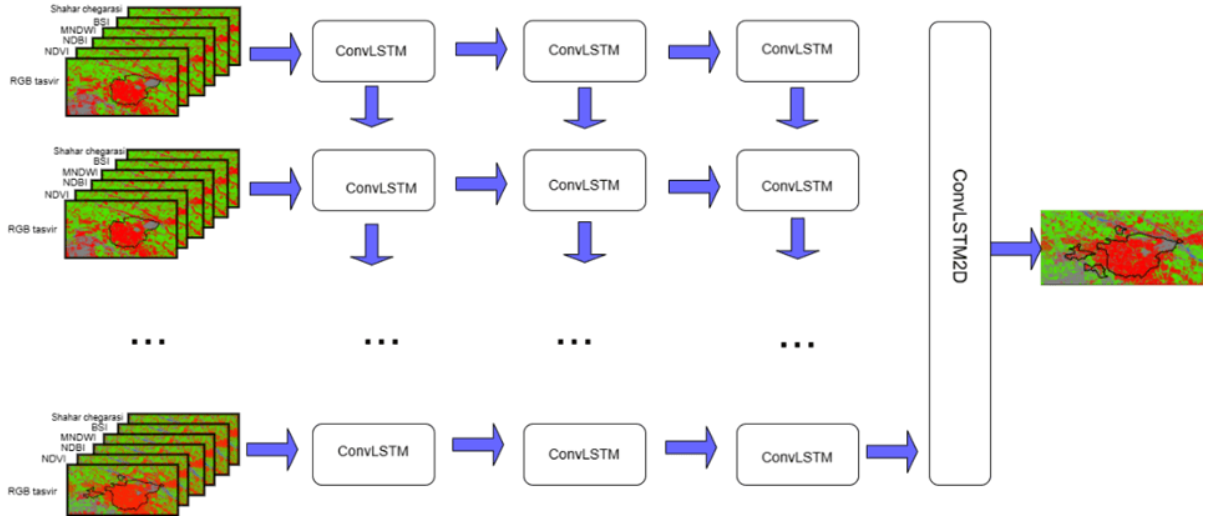


Рис. 4. Архитектура прогнозирования территориальных изменений города с помощью ConvLSTM

Алгоритм прогнозирования разрастания города состоит из следующих 5 шагов:

**Шаг 1.** Подготовка входных данных из городских изображений прошлых лет (1990-2022):

$$X_{kirish} = \{X_t, X_{t+1}, \dots, X_{t+n}\}.$$

**Шаг 2.** Изменение размеров входных изображений до 256x256 и нормализация:

$$X_{normalizatsiya} = \frac{(X_{kirish} - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}.$$

**Шаг 3.** Применение оператора *Canny* для извлечения характеристик из изображений:

$$F = Canny(I_{normalizatsiya}, sigma).$$

**Шаг 4.** Применение временных шагов для подготовки карт характеристик:

$$X = \{F_t, F_{t+1}, \dots, F_{t+n}\},$$

$$y = F_{t+n+1}.$$

**Шаг 5.** Обучение модели ConvLSTM2D и прогнозирование:

$$h_t = ConvLSTM2D(X_t, h_{t-1}, C_{t-1}),$$

$$C_t = f(h_t, C_{t-1}),$$

$$y_{bashorat} = Conv2D(h_t).$$

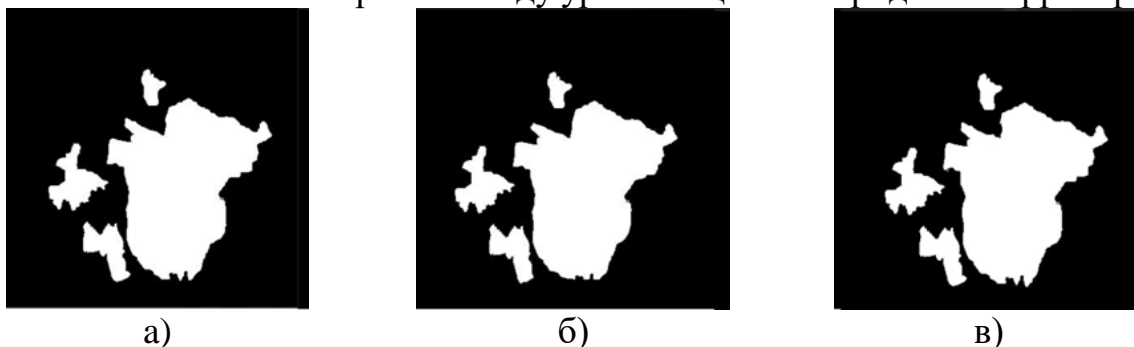
Разработан алгоритм прогнозирования изменения разрастания городов на основе глубокой нейронной сети.

Для оценки роста города также использовалась модель аллометрического роста. Оценка проводилась посредством урбанизации и разрастания городских территорий.

$$U = k \cdot A^\alpha,$$



где  $U$  - уровень урбанизации,  $A$  - площадь городской территории,  $k$  - коэффициент пропорциональности,  $\alpha$  - аллометрический экспонент, который показывает соотношение роста между урбанизацией и городской территорией.



**Рис. 5. Результаты прогнозных изображений Самаркандской области на следующие три года: а) 2024 год б) 2025 год в) 2026 год**

Определяется, сколько пикселей приходится на 1 км/кв городской площади 2023 года, и соответственно рассчитывается городская площадь на последующие годы. Определяется городская территория на 2024-2026 годы.

При этом прогноз был получен на следующие три года. Были получены уровень урбанизации и площадь городской территории.

**Таблица 2.**

**Прогнозируемый уровень урбанизации и площадь городской территории на 2024-2026 годы**

Год	Уровень урбанизации	Размер города
2024	13.95	120.0
2025	14.00	120.5
2026	14.08	121.2

Аллометрический экспонент роста города показал результат  $\alpha = 0.923$ . Поскольку  $\alpha < 1$  и близко к 1, это означает, что в следующие три года уровень урбанизации будет расти равномерно относительно разрастания территории.

В четвертой главе диссертации под названием «**Программный комплекс и экспериментальные исследования для прогнозирования процессов урбанизации**» описываются модели и программные средства, разработанные для прогнозирования урбанизации и оценки разрастания городов, а также представлен анализ полученных результатов.

Разработаны программа и модуль для решения задачи прогнозирования урбанизации. Описано применение различных моделей, и схематически представлена структура общей модели программы. Программный комплекс обладает следующими возможностями:

1. Применение различных моделей машинного обучения;
2. Анализ и визуализация данных;
3. Получение и анализ результатов прогнозирования.

Разработаны программные модули прогнозирования разрастания городов. При этом схематически представлено применение архитектуры ConvLSTM и внешний вид программных модулей. Программа состоит из следующих основных модулей:

1. Модуль обработки спутниковых изображений;



2. Модуль ConvLSTM;
3. Модуль прогнозирования и визуализации.

Проведены вычислительные эксперименты и сравнительный анализ. При прогнозировании уровня урбанизации были применены различные модели машинного обучения и проведен сравнительный анализ. Был спрогнозирован уровень урбанизации Самаркандской области на 2023 год и проведено сравнение с фактическим уровнем урбанизации Самаркандской области.

**Таблица 3.**

**Сравнительный анализ прогнозируемого уровня урбанизации**

Модели	Прогнозируемый уровень урбанизации	Фактический уровень урбанизации	Уровень точности
Линейная регрессия на 2023 год	12.628%	13.908%	90.8%
Дерево решений на 2023 год	13.032%	13.908%	93.7%
Случайный лес на 2023 год	13.323%	13.908%	95.8%
SVM на 2023 год	13.171%	13.908%	94.7%
KNN на 2023 год	13.365%	13.908%	96.1%
XGBoost на 2023 год	13.129%	13.908%	94.4%
2024*	13.955%		
2025*	14.006%		
2026*	14.084%		

\*Фактический уровень урбанизации и степень точности не рассчитывались из-за отсутствия статистических данных за 2024-2026 годы.

Для прогнозирования разрастания города по спутниковым снимкам были применены модели глубокого обучения. Это было реализовано с использованием архитектуры ConvLSTM. Была спрогнозирована городская граница на 2023 год и проведен сравнительный анализ. Проведено сравнение с другими моделями прогнозирования территориального разрастания города. Результаты сравнения различных моделей, использованных в исследовании, представлены в следующей таблице.

**Таблица 4.**

**Результаты оценки точности моделей**

Модели	Accuracy	MAE	RMSE	IoU
ConvLSTM	87.3%	0.087	0.097	0.88
Cellular Automata	86.7%	0.120	0.115	0.84
SLEUTH	78.0%	0.157	0.130	0.78
U-Net	79.0%	0.360	0.180	0.79

Полученные результаты показали высокую эффективность предложенных моделей в прогнозировании процессов урбанизации. Модель ConvLSTM продемонстрировала высокую точность прогнозирования изменений городской территории с показателями точности 87.3%, MAE-0.087, RMSE-0.097 и IoU-0.88.

Общие результаты показывают, что применяемая методология демонстрирует высокую эффективность в прогнозировании территориального разрастания города на примере Самарканда. Данный подход позволил точно отразить не только общие тенденции разрастания города, но и изменения в его внутренней структуре.

Эти результаты могут быть применены в ряде областей, таких как городское планирование и развитие инфраструктуры. Кроме того, данная

методология может быть адаптирована и применена к другим городам, что способствует устойчивому развитию городов в широком масштабе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны модели и алгоритмы на основе искусственного интеллекта для прогнозирования процессов урбанизации и оценки разрастания городов. В качестве основных результатов проведенного исследования можно отметить следующее:

1. Проведен анализ научно-технической литературы, освещающей теоретические и практические аспекты современных методов и алгоритмов искусственного интеллекта, применяемых в системах прогнозирования процессов урбанизации и оценки разрастания городов. Это позволило разработать новые подходы и гибридные алгоритмы для интеллектуального анализа данных урбанизации. Также были выявлены преимущества и недостатки существующих методов.

2. Предложена разработка модели прогнозирования уровня урбанизации на основе mutual information и моделей машинного обучения. Данный подход значительно повысил эффективность прогнозирования и позволил более точно оценить взаимосвязи между данными.

3. Для решения задачи прогнозирования разрастания города применена архитектура ConvLSTM, основанная на глубоком обучении. Это позволило точно прогнозировать границы города с использованием спутниковых снимков.

4. Также был оценен аллометрический рост уровня урбанизации и городской территории. При этом было установлено, что в последующие годы уровень урбанизации будет расти равномерно по отношению к расширению территории.

5. Предложенная нами модель прогнозирования уровня урбанизации была проанализирована в сравнении с различными другими моделями машинного обучения. При этом было установлено, что предложенная модель является эффективной.

6. Разработан комплексный подход к обработке и анализу спутниковых снимков для прогнозирования разрастания города. Этот подход включает преобразование снимков Landsat в изображения земного покрова и прогнозирование с помощью архитектур ConvLSTM. При этом было установлено, что предложенная нами модель показывает лучшие результаты по сравнению с другими моделями глубокого обучения.

Разработанные модели и алгоритмы были апробированы в Самаркандской области. Это имеет важное практическое значение в городском планировании и управлении и может быть применено при разработке стратегий развития города.

**SCIENTIFIC COUNCIL AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.13/30.12.2021.T.142.01 AT RESEARCH INSTITUTE FOR  
DEVELOPMENT OF DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL  
INTELLIGENCE**

---

**RESEARCH INSTITUTE FOR THE DEVELOPMENT OF DIGITAL  
TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

**ISMAILOV ILKHOM TURSUNBAYEVICH**

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODELS AND ALGORITHMS IN  
FORECASTING URBANIZATION PROCESSES**

05.01.11 – Digital technologies and artificial intelligence

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

**Tashkent – 2025**

**The theme of doctor of philosophy (PhD) dissertation on technical sciences was registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under the number B2023.4.PhD/T4193.**

The dissertation was performed at the Scientific Research Institute of Digital Technologies and Artificial Intelligence.

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

**Scientific adviser:**

**Muhamediyeva Dildora Kabilovna**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

**Official opponents:**

**Rustamov Nasim Tulegenovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Yusupov Ozod Rabbimovich**

Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences,  
Associate Professor

**Leading organization:**

**Nukus Branch of Tashkent University of  
Information Technologies named after  
Muhammad al-Khwarizmi**

The defense will take place at "21" february 2025 at 16<sup>00</sup> at the meeting of the Scientific Council DSc.13/30.12.2021.T.142.01 under the Scientific Research Institute of Digital Technologies and Artificial Intelligence (Address: 100125, Tashkent city, Mirzo-Ulugbek district, Buz-2 massif, house 17-A. Phone: (99871) 2634198).

The dissertation can be reviewed at the Information Resource Center of the Scientific Research Institute of Digital Technologies and Artificial Intelligence (registration number № 54) (Address: 100125, Tashkent city, Mirzo-Ulugbek district, Buz-2 massif, house 17-A. Phone: (99871) 2634198).

Abstract of dissertation sent out on « 8 » february 2025.

(Dispatching protocol № 1, on « 16 » January 2025).



**N. Ravshanov**

Deputy Chairman of the scientific council  
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

**R.X. Xamdamov**

Chairman of the scientific seminar at the Scientific  
Council on award of scientific degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

**The purpose of the research** is to develop models and algorithms for forecasting the level of urbanization based on statistical data related to urbanization processes, as well as predicting territorial changes based on satellite imagery.

**The object of research** examines processes related to predicting the level of urbanization with multiple characteristics and territorial changes based on satellite images.

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

- a model for predicting the level of urbanization has been developed based on reducing the feature space using a method for measuring the relationship between two random variables;

- an algorithm for converting satellite images into land cover images has been improved using machine learning methods;

- an approach to reducing the dimensionality of land cover images based on principal component analysis has been developed;

- an architecture for assessing urban area changes based on deep neural networks has been developed for predicting city expansion.

**The practical results of the research** are as follows:

- forecast values of urbanization levels for the next 3 years have been calculated for the Samarkand region based on urbanization prediction algorithms;

- software modules have been developed for models and algorithms predicting urbanization levels and territorial changes.

**Implementation of research results.** The scientific results based on developed models and algorithms for predicting urbanization levels and territorial changes:

The model for predicting territorial changes based on convolutional recurrent neural network architecture has been implemented at the "ICT Development Center" under Samarkand Region Administration for planning architectural projects in Samarkand city (Reference No. 02-02/240 dated May 2, 2024, from Samarkand Region Administration of the Republic of Uzbekistan). As a result, it has enabled increased work efficiency in planning urban architectural projects.

The algorithms for predicting urbanization levels using small training samples based on feature space reduction using mutual information measure and local weighted smoothing strategy for urbanization prediction models have been applied at Samarkand Region Statistics Department to identify development trends of populated areas (Reference No. 02-02/240 dated May 2, 2024, from Samarkand Region Administration of the Republic of Uzbekistan). As a result, it has enabled reduction in time spent on infrastructure project development processes and improved forecasting accuracy.

The algorithm for converting satellite images into land cover images and the model for predicting territorial changes based on convolutional recurrent neural network architecture have been implemented at the Samarkand city branch of the State Cadastre Chamber for updating land cadastre data (Reference No. 02-02/240 dated May 2, 2024, from Samarkand Region Administration of the Republic of Uzbekistan). As a result, it has enabled increased work efficiency in updating land cadastre data.

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

**I bo'lim (Часть I; Part I)**

1. Muhamediyeva, D., Ismailov, I., Bobokulov, S. Forecasting urban territorial expansion using GIS and artificial intelligence technologies // E3S Web of Conferences 590. – 2024. – P. 1-11. (№ 3, Scopus, IF=0,52).
2. Muhamediyeva D., Ruzibaev O., Ismailov I. Selecting a Suitable Initial Approximation Of Multi-Component Cross-Diffusion Systems // 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). – 2021, Pp. 1-6, (05.00.00; 30.10.2021 № 525 son OAK Rayosatining qarori).
3. Muxamediyeva, D.K., Ismailov, I.T., Ermamatova, S.E. Estimating the level of urbanization based on machine learning // In Third International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTIEE). – 2024. – Vol. 13217. – P. 132170W. (№ 3, Scopus, IF=0,34).
4. Ismailov I. T. Bosh komponentalar tahlili yordamida urbanizatsiya darajasiga ta'sir qiluvchi belgilar fazosini shakllantirish // Евразийский журнал математической теории и компьютерных наук. – 2024. – Val.4. – P. 37–44. ( SJIF, IF 7,906). (№01.07/2200 OAK Rayosatining qarori)
5. Ismailov, I.T. Machine Learning-Based Approach to Forecasting the Degree of Urbanization // Science and Innovation. – 2024. – Val. 3. – P. 56-62. (SJIF, IF 6,735). (№01-07/1368 OAK Rayosatining qarori)
6. Ismailov, I.T. Samarqand viloyatining aholi sonini bashoratlashning eksponensial modeli // Tadqiqot va Innovatsiyalar Jurnal. – 2024. – Val.2. – P. 15-23. (SJIF, IF 5,435). (№01.02/1199 OAK Rayosatining qarori)

**II bo'lim (Часть II; Part II)**

7. Muhamediyeva D.K., Ismailov I.T., Doshchanova M.Yu., Shaazizova M.E., Nosirov S.U. Neural Network Method For Solving A Nonlinear Problem Of Cross-Diffusion Task With Variable Density // Annals of R.S.C.B. – 2021. – Vol. 25. – P. 666-679.
8. Ismailov I.T., Dusanov X.T. Urbanizatsiyani bashoratlashdagi muammolar. //Educational Research in Universal Sciences. – 2023. – Val. 2. – P. 464-468.
9. Ismailov I.T., Ermamatova Sh.Sh. Forecasting the degree of urbanization using an artificial neural network model. Евразийский журнал технологий и инноваций. – 2024. – Vol. 2. – P.92–100.
10. Ismailov I. T. Toshkent shahar aholi o'sishining eksponensial matematik modeli // International conference on teaching, education and new learning technologies. – 2023. – Vol. 1. – P. 722–726.
11. Ismailov I. T., Ermamatova S. E. Shahar kengayishini bashoratlashning ahamiyati va modellari // Educational Research in Universal Sciences. – 2024. – Vol. 3. – P. 29–134.

12. Ismailov I. T., Ermamatova Sh. E. Urbanizatsiya jarayonlarini bashoratlashning ahamiyati va usullari // Journal of Fundamental Studies. – 2024. – Vol. 2. – P. 63–68.
13. Ismailov I. T. Use of artificial intelligence in the city management system: international experiences // Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. – 2022. – Vol. 10. – P.1342–1348.
14. Ismailov I. T. Urbanizatsiyani bashoratlashdagi muammolar // Educational Research in Universal Sciences. – 2023. – Vol. 2. – P. 464–468.
15. Ismailov I. T., Ermamatova Sh.E. Urbanizatsiya jarayonida iqtisodiy o'sish va sun'iy intellektning roli // Innovations in Technology and Science Education. – 2024. – Vol. 3. – P. 326–333.
16. Ismailov I.T. Forecasting Population Growth in Samarkand Region Using a Logistic Model // Amaliy va Fundamental Tadqiqotlar Jurnali. – 2024. – Vol. 3. – P. 1-7.
17. Ismailov I.T., Ermamatova, Sh. E. Shahar kengayishini bashorat qilishda CNN+LSTM yondashuv. // Sun'iy intellekt va raqamli ta'lim texnologiyalari: amaliyot, tajriba, muammo va istiqbollari mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy Anjuman. Samarqand. 2024, 95-98 b.
18. Ismailov I.T., Ermamatova, Sh.E. Urbanizatsiya darajasini bashorat qilishda sun'iy intellekt modellarni qo'llash. // Sun'iy intellekt va raqamli ta'lim texnologiyalari: amaliyot, tajriba, muammo va istiqbollari mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman. Samarqand. 2024, 99-103 b.
19. Ismailov I.T. Effectiveness of using CONVLSTM and U-NET architecture in predicting urban expansion. // Zamonaviy axborot, kommunikatsiya texnologiyalari va AT-ta'lim tatbiqi muammolari mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjuman. Samarqand. 2024. 86-88 b.
20. Ismailov I.T. Mashinaviy o'qitish algoritmi asosida suniy yo'ldosh tasvirlarni yer qoplamalari va yer o'zgarishi tasvirlariga keltirish algoritmi. // Kompyuter ilmlari va muhandislik texnologiyalari mavzusidagi Xalqaro ilmiy-texnik anjuman. Jizzax. 2024. 8-11 b.
21. Ismailov I.T. Urbanizatsiya jarayonlarni bashoratlash modellari. // Kompyuter ilmlari va muhandislik texnologiyalari mavzusidagi Xalqaro ilmiy-texnik anjuman. Jizzax. 2024. 11-15 b.
22. Ismailov I.T. Bu dastur suniy yo'ldosh tasvirlari asosida shahar kengayishini suniy intellekt yordamida bashorat qiladi. O'zbekiston respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi. № DGU 33118, 06.02.2024 y.
23. Ismailov I.T., Ermamatova, Sh.E., Gayibnazarova Z.M., Mirzanova N.M. Urbanizatsiya darajasini bashorat qilishda sun'iy intellektga asoslangan modellar. O'zbekiston respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intellektual mulk agentligi. № DGU 37425, 08.05.2024 y.

Avtoreferat “Muhammad al-Xorazmiy avlodlari” jurnal tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlarini mosligi tekshirildi.