QORAQALPOG‘ISTON ARXEOLOGIK MEROSI VA SUN’IY INTELLEKT: VIRTUAL REKONSTRUKSIYA HAMDA 3D TEXNOLOGIYALARI ISTIQBOLLARI

Bazarbayev Behzod Begmurat o‘g‘li

bazarbayevbehzodd@gmail.com

Annotatsiya: mazkur tizesda Qoraqalpog‘iston Respublikasi hududidagi qadimiy arxeologik yodgorliklar va madaniy meros obyektlarini saqlab qolish hamda ommalashtirishda 3D modellashtirish va sun’iy intellekt (SI) texnologiyalarining o‘rni tadqiq etilgan. Orolbo‘yi ekologik inqirozi sharoitida tarixiy obidalarning jadal yemirilish jarayonlarini to‘xtatish uchun an’anaviy usullar bilan birga raqamli innovatsiyalarni (xususan, LiDAR skanerlash va fotogrammetriya) qo‘llash zarurati ilmiy asoslangan. Shuningdek, qisman vayron bo‘lgan artefaktlarni virtual rekonstruksiya qilish, manbashunoslik tahlillarini optimallashtirish va mintaqa turizm salohiyatini oshirishda “Raqamli tarix” (Digital History) konsepsiyasining metodologik afzalliklari ochib berilgan.

Kalit so‘zlar: Qoraqalpog‘iston arxeologiyasi, qadimgi Xorazm, madaniy meros, 3D modellashtirish, sun’iy intellekt, virtual rekonstruksiya, raqamli tarix, LiDAR.

Аннотация: В данной статье исследуется роль 3D-моделирования и технологий искусственного интеллекта (ИИ) в сохранении и популяризации древних археологических памятников и объектов культурного наследия на территории Республики Каракалпакстан. Научно обоснована необходимость применения цифровых инноваций (в частности, LiDAR-сканирования и фотограмметрии) наряду с традиционными методами для предотвращения ускоренного разрушения исторических памятников в условиях экологического кризиса Приаралья. Также раскрыты методологические преимущества концепции «Цифровая история» (Digital History) в

виртуальной реконструкции частично разрушенных артефактов, оптимизации источниковедческого анализа и повышении туристического потенциала региона.

Ключевые слова: археология Каракалпакстана, древний Хорезм, культурное наследие, 3D-моделирование, искусственный интеллект, виртуальная реконструкция, цифровая история, LiDAR.

Abstract: This article explores the role of 3D modeling and artificial intelligence (AI) technologies in preserving and popularizing ancient archaeological monuments and cultural heritage sites in the Republic of Karakalpakstan. The necessity of using digital innovations (specifically, LiDAR scanning and photogrammetry) alongside traditional methods to prevent the accelerated destruction of historical monuments under the conditions of the Aral Sea ecological crisis is scientifically substantiated. Furthermore, the methodological advantages of the “Digital History” concept in the virtual reconstruction of partially destroyed artifacts, optimization of source analysis, and enhancement of the region's tourism potential are revealed.

Keywords: Karakalpakstan archaeology, ancient Chorasmia, cultural heritage, 3D modeling, artificial intelligence, virtual reconstruction, digital history, LiDAR.

Qoraqalpog‘iston Respublikasi hududi qadimiy sivilizatsiyalar chorrahasi, xususan, qadimgi Xorazm davlatchiligi shakllangan, zardushtiylik ta’limoti ildiz otgan va jahon madaniyatining noyob durdonalari yaratilgan bebaho tarixiy zamin hisoblanadi. Orolbo‘yi mintaqasida joylashgan yuzlab arxeologik yodgorliklar – Tuproqqal’a, Ayozqal’a, Qo‘yqirilganqal’a, Qizilqal’a, Mizdaxqon majmuasi kabi ochiq osmon ostidagi muzey-qal’alar, shuningdek, I.V.Savitskiy nomidagi Qoraqalpog‘iston davlat san’at muzeyida saqlanayotgan noyob ashyoviy manbalar nafaqat milliy, balki butunjahon madaniy merosining ajralmas qismidir. Tarix fani va manbashunoslik nuqtai nazaridan ushbu osori-atiqalar o‘tmish ajdodlarimizning

ijtimoiy-siyosiy hayoti, iqtisodiyoti, urbanizatsiya jarayonlari, mudofaa tizimi, xom g‘isht me’morchiligi maktabi hamda diniy-falsafiy qarashlarini o‘rganishda beqiyos tayanch manba bo‘lib xizmat qiladi.

O‘tgan asrning 30-40-yillarida S.P.Tolstov rahbarligidagi Xorazm arxeologiya-etnografiya ekspeditsiyasi tomonidan jahon fani uchun kashf etilgan bu “Qumliklar ostonasidagi sivilizatsiya” sirlari hamon to‘laqonli o‘rganilmagan. Biroq, bugungi kunda ushbu bebaho tarixiy manbalarni kelajak avlodga bus-butun yetkazish masalasi global tahdidlar ostida qolmoqda. Mintaqaning o‘ziga xos qat’iy kontinental iqlimi, haroratning keskin o‘zgarishi, kuchli shamol erroziyasi va qum bo‘ronlari tarixiy obyektlar kushandasiga aylangan. Xususan, Orol dengizi halokati oqibatida yuzaga kelgan ekologik inqiroz – tuproq va havodagi tuz miqdorining ortishi ochiq osmon ostidagi qadimiy qal’alarning jadal sur’atlar bilan yemirilishiga (degradatsiyasiga) olib kelmoqda. Antropogen omillar va tabiat hodisalari ta’sirida ming yillar davomida saqlanib kelgan xom g‘isht va paxsa inshootlar yildan-yilga o‘zining asl arxitektura qiyofasini yo‘qotmoqda.

Arxeologik obidalarni saqlashning an’anaviy metodlari bo‘lgan jismoniy konservatsiya va restavratsiya usullari ko‘p hollarda obyektlarning yemirilish jarayonini to‘liq to‘xtatib qola olmayapti, ba’zida esa noto‘g‘ri aralashuv oqibatida tarixiy manbaning autentik (asl) holatiga ziyon yetkazish holatlari ham kuzatilmoqda. Shu sababli, XXI asr tarix fani va arxeologiyasida metodologik burilish yasash, “Raqamli tarix” (Digital History), “Virtual arxeologiya” hamda “Raqamli meros” (Digital Heritage) konsepsiyalariga o‘tish kechiktirib bo‘lmaydigan obyektiv zaruratga aylandi.

Aynan shu nuqtai nazardan, Qoraqalpog‘istonning boy tarixiy merosini saqlab qolish, ilmiy muomalaga kiritish va ommalashtirishda 3D modellashtirish hamda sun’iy intellekt (SI) texnologiyalaridan foydalanish masalasi bugungi kunning eng dolzarb ilmiy-amaliy muammolaridan biri sanaladi. Fotogrammetriya va LiDAR (Light Detection and Ranging) skanerlash texnologiyalari orqali arxeologik

obyektlar, me’moriy inshootlar va muzey artefaktlarining millimetr aniqligidagi “raqamli egizaklari”ni (digital twins) yaratish imkoniyati mavjud. Bu jarayon obyektni jismonan yo‘qolish yoki parchalanish xavfidan sug‘urtalabgina qolmay, tadqiqotchilarga (tarixchi, arxeolog, antropolog, san’atshunoslarga) obidaning istalgan qismini kompyuter monitorida turib, asliga jismoniy ta’sir o‘tkazmagan holda chuqur tahlil qilish imkonini beradi. Raqamlashtirilgan 3D modellar tarixiy axborot bazasini abadiylashtirishda mislsiz qadamdir.

O‘z navbatida, sun’iy intellekt (SI) texnologiyalarining tarixiy jarayonlarga va o‘tmishni qayta tiklashga tatbiq etilishi tadqiqotlar ko‘lamini butunlay yangi bosqichga olib chiqadi. Mashinali o‘qitish (Machine Learning) va neyrotarmoqlar yordamida qisman vayron bo‘lgan arxeologik topilmalarni (masalan, sopol siniqlari, ganchkor naqshlar, suyak qoldiqlari) kompyuter xotirasida o‘zaro moslashtirish va asl qiyofasini qayta tiklash mumkin. Shuningdek, SI vositasida qadimiy yozuvlarni shifrini yechish, arxitektura obidalarining dastlabki loyihaviy ko‘rinishini bashorat qilish hamda iqlim o‘zgarishlarining qadimiy obidalarga ko‘rsatadigan ta’sir modellarini ishlab chiqish tarixchilar uchun qimmatli ilmiy xulosalar beradi.

Bundan tashqari, mazkur zamonaviy texnologiyalar Qoraqalpog‘iston tarixiy merosini keng ommaga, ayniqsa yoshlarga yetkazish va xalqaro miqyosda targ‘ib qilishda ulkan imkoniyatlar eshigini ochadi. Virtual reallik (VR) va to‘ldirilgan reallik (AR) texnologiyalari yordamida yaratilgan vizual interaktiv mahsulotlar jahonning istalgan nuqtasidagi insonga Qadimgi Xorazm qal’alari bo‘ylab virtual sayohat qilish, o‘tmish ruhiyatini his qilish imkonini beradi. Bu esa nafaqat milliy o‘zlikni anglash va tarixiy xotirani mustahkamlashga, balki Orolbo‘yi mintaqasining ilmiy va turistik jozibadorligini oshirishga ham bevosita xizmat qiladi. O‘zbekiston Respublikasining madaniy meros obyektlarini raqamlashtirish va muhofaza qilishga doir davlat dasturlarida belgilangan ustuvor vazifalardan kelib chiqqan holda, ushbu mavzuni tarix fanlari kesimida ilmiy jihatdan chuqur

tahlil etish, uning metodologik va amaliy asoslarini ishlab chiqish bugungi kunning kechiktirib bo‘lmaydigan, o‘ta dolzarb vazifasidir.

Tarixiy yodgorliklarni raqamlashtirish jarayoni bugungi kunda faqatgina axborot texnologiyalari (IT) mutaxassislarining sohasi bo‘lib qolmay, balki tarixchilar, arxeologlar, manbashunoslar, restavratorlar va san’atshunoslarning bevosita ilmiy ishtirokini talab etadigan kompleks tadqiqot maydoniga aylandi. Qoraqalpog‘istonning boy moddiy va madaniy merosini tadqiq etishda 3D modellashtirish va sun’iy intellektning (SI) qo‘llanilishi shunchaki vizualizatsiya vositasi emas, balki chuqur tahliliy, rekonstruktiv va gnoseologik (bilish) metod sanaladi. Jahon ilm-fanida keng ommalashayotgan “Digital Humanities” (Raqamli gumanitar fanlar) yo‘nalishining aynan Qoraqalpog‘iston tarixiy topografiyasi va muzey fondlariga joriy etilishi fanda o‘nlab yillar davomida yechimini kutayotgan ko‘plab muammolarni bartaraf etishi mumkin.

Qoraqalpog‘iston hududidagi antik va o‘rta asrlar mudofaa, diniy va shaharsozlik madaniyatini o‘zida aks ettiruvchi Ayozqal’a, Tuproqqal’a, Qo‘yqirilganqal’a, Qizilqal’a, Janpiqqal’a, Chilpiq daxmasi va Mizdaxqon majmuasi kabi yodgorliklarning o‘ziga xosligi – ularning asosan mahalliy xomashyo bo‘lmish tuproq, paxsa va xom g‘ishtdan bunyod etilganligidadir. Aynan shu me’moriy omil ularning tabiat injiqliklariga, iqlimning keskin isishi va Orol dengizi fojeasi oqibatida kuchaygan tuzli shamollarga o‘ta ta’sirchanligini belgilab beradi. Mazkur obyektlarni xujjatlashtirish va saqlab qolishda zamonaviy fotogrammetriya, yerdan lazerli skanerlash (Terrestrial Laser Scanning) hamda LiDAR (Light Detection and Ranging) texnologiyalari g‘oyat muhim ahamiyat kasb etadi.

LiDAR texnologiyasi va maxsus datchiklar bilan jihozlangan uchuvchisiz uchish apparatlari (dronlar) yordamida olingan milliardlab nuqtali koordinatalar bazasi (point clouds) orqali ochiq osmon ostidagi qal’alarning mikromillimetr aniqligidagi uch o‘lchamli (3D) topografik tarhi yaratiladi. Ushbu “Virtual

arxeologiya” usuli yordamida tadqiqotchilar tuproq ostida yashiringan, hali qazib olinmagan yoki vaqt o‘tishi bilan tekislanib ketgan qadimiy devorlar, xonalar majmuasi va shahar ko‘chalarining joylashuv tartibini kompyuter grafikasi orqali har tomonlama chuqur tahlil qila oladilar.

Masalan, Tuproqqal’adagi mashhur qadimgi hukmdorlar saroyi qoldiqlari, uning murakkab arxitektura qismlari, yong‘in va vaqt ta’sirida yemirilgan nodir devoriy suratlar va haykaltaroshlik namunalari qoldiqlari 3D modellashtirish orqali virtual makonda to‘liq hajmiy shaklda, o‘zining dastlabki ranglarida qayta tiklanishi (virtual anastiloz va rekonstruksiya) kafolatlanadi. Bu amaliyot obidani jismoniy yo‘q bo‘lish xavfidan saqlab, yong‘in yoki qulash holatlarida ham obidani qayta tiklash imkonini beruvchi abadiy raqamli arxivga aylantiradi. Shuningdek, davriy ravishda o‘tkaziladigan 3D skanerlash orqali yillar davomida ro‘y berayotgan yemirilish sur’ati (degradatsiya dinamikasi) aniq monitoring qilinadi, natijada obidaning aynan qaysi qismi tezroq qulash xavfi ostida ekanligi kashf etilib, byudjet va moliyaviy resurslar to‘g‘ridan-to‘g‘ri eng zarur jismoniy konservatsiya ishlariga yo‘naltiriladi.

Tarixiy obidalarni tadqiq etishda hamda I.V.Savitskiy nomidagi Qoraqalpog‘iston davlat san’at muzeyidagi o‘n minglab arxeologik artefaktlarni, numizmatika va etnografiya namunalarini ilmiy muomalaga kiritishda sun’iy intellekt (SI) algoritmlari mutlaqo inqilobiy yechimlarni taklif etadi. Arxeologik qazishmalar paytida topilgan zardushtiylik ossuariylari (suyakdonlari), noyob sopol idishlar, loy haykalchalar va naqshinkor arxitektura bezaklari qoidaga ko‘ra parchalangan, mayda siniq holatda topiladi.

Mashinali o‘qitish (Machine Learning) va chuqur neyrotarmoqlar (Deep Learning) texnologiyalari yordamida yuzlab, hatto minglab mayda siniq qismlarning geometrik shakli, qalinligi, rangi, kimyoviy tarkibi va naqsh tushish chiziqlari kompyuter xotirasida soniyalar ichida tahlil qilinadi. Algoritm mavjud mantiqiy “pazl”larni o‘zaro xatosiz moslashtirib, obyektning asl qiyofasini 3D

makonda yig‘ib ko‘rsatadi. Bu inson aqli va jismoniy imkoniyatlari yillab, ba'zan o‘n yillab sarflaydigan mashaqqatli arxeologik mehnatni karrasiga qisqartiradi hamda inson omili sababli kelib chiqadigan jismoniy va mantiqiy xatolarni nolga tushiradi.

Sun’iy intellektning yana bir ulkan ilmiy salohiyati – epigrafika va paleografiyada, ya’ni qadimiy shifrlarni va noaniq yozuvlarni o‘qishdagi ahamiyatidir. Qadimgi Xorazm yozuvi (oromiy yozuvi asosida shakllangan) kabi murakkab, ko‘p hollarda chala saqlangan bitiklarni kompyuterning ko‘rish qobiliyati (Computer Vision), optik belgilarni aniqlash (OCR) tizimlari va qadimgi tillarga moslashtirilgan maxsus lingvistik modellar vositasida deshifrovka qilish mumkin. SI algoritmlari qadimiy tangalar, yog‘och taxtachalar yoki xumlar yuzasidagi o‘chib ketgan, inson ko‘zi ilg‘amaydigan chiziqlarni infraqizil tahlillar bazasiga tayangan holda o‘qib, yo‘qolgan matnlarni sintaktik va semantik jihatdan to'ldiradi. Bundan tashqari, maxsus bashorat qiluvchi tahlil (predictive analytics) algoritmlari ekologik o‘zgarishlarning (suv tanqisligi, harorat anomaliyalari, tuz bo'ronlari) hududdagi yodgorliklarga kelgusi o‘n yilliklarda qanday fizik va kimyoviy ta’sir qilishini aniq matematik modellar asosida hisoblab chiqadi.

Tadqiqotning eng amaliy va iqtisodiy jihatdan foydali bosqichlaridan biri bu – raqamlashtirilgan merosni tor doiradagi ilmiy arxivlarda ushlab turmasdan, balki keng jamoatchilik, yosh avlod va xalqaro hamjamiyat uchun zamonaviy formatda ommalashtirishdir. 3D modellar va SI orqali tiklangan obidalar mintaqaning turistik jozibadorligini umuman yangi bosqichga ko‘taradi. Qoraqalpog‘istonning jahon madaniy merosi obyektlarini to‘ldirilgan reallik (Augmented Reality - AR), virtual reallik (Virtual Reality - VR) texnologiyalari va Metaverse (Virtual olam) maydonlariga kiritish nafaqat madaniy saqlanishni, balki iqtisodiy rentabellikni ham ta'minlaydi.

Xususan, mashhur “Ellikqal’a” marshruti bo‘ylab sayohat qilayotgan xorijiy yoki mahalliy sayyoh vayronaga aylangan qadimiy qal'a devorlari oldida turib,

maxsus VR ko‘zoynaklar yoki oddiy smartfonidagi AR ilovasi orqali obidaning 2000 yil oldingi haybatli va asl ko‘rinishini ko‘rishi mumkin. Dasturiy vizualizatsiya obyekt qanday qurilganligini, ko'chalarda qaynayotgan ijtimoiy hayotni, xonalardagi bezaklarni, qal'a atrofidagi mudofaa xandaqlari va suv inshootlarini to‘liq hajmdagi animatsion formatda jonlantirib beradi. Sun’iy intellektga asoslangan virtual gidlar (AI tour guides) bir vaqtning o‘zida o‘nlab tillarda xizmat ko'rsatib, sayyohning har qanday mantiqiy yoki tarixiy savoliga ilmiy manbalar va arxiv xujjatlariga tayangan holda asosli javob qaytaruvchi mukammal va uzluksiz muloqot tizimiga aylanadi.

Uzluksiz ta’lim tizimida esa ushbu ilg'or texnologiyalarni amaliyotga joriy etish orqali “Raqamli tarix” fani va metodikasini rivojlantirish mumkin. Maktab o‘quvchilari va universitet talabalari o‘tmish xronologiyasini shunchaki darsliklardagi quruq faktlar va oq-qora suratlar orqali yodlamasdan, balki o‘yinlashtirilgan (gamification) elementlar orqali vizual-immersiv (jarayon ichiga chuqur kirish) tarzda kashf etadilar. Qadimgi mintaqa sivilizatsiyasi qanday mudofaa tizimlarini o'ylab topgani, qanday qilib cho'l iqlimida mo'jizaviy qal'alar bunyod etganini interaktiv usullarda namoyish etish — yosh avlodda tarixiy xotira va milliy g‘urur tuyg‘usini tarbiyalashda har qanday an’anaviy pedagogik darsdan ko‘ra yuz chandon samaraliroq natija beradi.

Shu o‘rinda, Orolbo‘yi mintaqasining jahon sivilizatsiyasidagi betakror o‘rnini ko‘rsatish maqsadida Ochiq ma'lumotlar bazasiga (Open Data) asoslangan “Qadimgi Xorazm raqamli xaritasi” xalqaro portali va muzeylarning VR 3D fondlarini yaratish maqsadga muvofiqdir. Bu qadam milliy merosni butun dunyo tadqiqotchilari uyi va tajribaxonalariga olib kirish orqali, O‘zbekiston Respublikasini Markaziy Osiyo mintaqasidagi innovatsion tarixiy turizm va raqamli ilm-fan xabiga (markaziga) aylantirishda hal qiluvchi rol o'ynaydi.

Xulosa qilib aytganda, Qoraqalpog‘iston Respublikasining boy tarixiy va madaniy merosini asrab-avaylashda 3D modellashtirish hamda sun’iy intellekt

texnologiyalarining joriy etilishi shunchaki texnologik yangilik emas, balki davrning kechiktirib bo‘lmaydigan obyektiv zaruratidir. Orolbo‘yining og‘ir ekologik sharoiti, tuproq sho‘rlanishi va iqlim o‘zgarishlari ta’sirida kun sayin yemirilayotgan qadimiy Xorazm qal’alari hamda nodir artefaktlarni an’anaviy restavratsiya usullari bilan to‘liq saqlab qolish borgan sari qiyinlashmoqda.

Raqamli texnologiyalar, xususan, fotogrammetriya va LiDAR vositasida yaratilgan obidalarning “raqamli egizaklari” ularning bugungi kundagi qiyofasini kelajak avlod uchun abadiy muhrlaydi. Sun’iy intellekt (SI) algoritmlari esa qisman vayron bo‘lgan ashyolarni virtual rekonstruksiya qilish, qadimiy bitiklarni shifrdan chiqarish, shuningdek, yodgorliklarning kelgusidagi yemirilish jarayonlarini bashorat qilish orqali manbashunoslik va arxeologiya fanlarida keng tadqiqot ufqlarini ochadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI:

1. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “Moddiy madaniy meros obyektlarini muhofaza qilish sohasidagi faoliyatni tubdan takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi 2018-yil 19-dekabrdagi PQ-4068-son Qarori // Qonun hujjatlari ma’lumotlari milliy bazasi, 20.12.2018-y., 07/18/4068/2345-son.
2. Babadjanov G‘.B. Qoraqalpog‘iston arxeologik yodgorliklari va ularni saqlash muammolari. – Nukus: Qoraqalpog‘iston, 2019. – 184 b.
3. Kamalov M.A., Jumanov A.R. Madaniy meros obyektlarini ta’mirlash va qayta tiklashda axborot texnologiyalaridan foydalanish // O‘zbekiston tarixi jurnali. – Toshkent, 2021. – № 3. – B. 45-52.
4. Raxmanov A.N. Qadimgi Xorazm mudofaa inshootlari va ularning tarixiy evolyutsiyasi. – Toshkent: Fan, 2017. – 212 b.
5. Toshev O.T. Arxeologiyada 3D formatlashtirish va virtual reallik: muammo va yechimlar // Xorazm Ma’mun akademiyasi axborotnomasi. – Xiva, 2022. – № 5. – B. 112-118.

6. Xo‘jayev M.X. Ochiq osmon ostidagi muzeylar va ularning turistik salohiyati (Qoraqalpog‘iston Respublikasi misolida). – Toshkent: Iqtisodiyot, 2020. – 156 b.

7. Толстов С.П. Древний Хорезм. Опыт историко-археологического исследования. – Москва: Издательство МГУ, 1948. – 352 с.

8. Ягодин В.Н., Беттс А.В. Золотое кольцо Хорезма: Археологические памятники Каракалпакстана. – Ташкент: San'at, 2015. – 128 с. 9. Коробов Д.С. Основы геоинформатики в археологии. – Москва: Издательство МГУ, 2011. – 224 с.

10. Леонтьев А.В., Смирнов А.С. Использование технологий искусственного интеллекта и 3D-моделирования для виртуальной реконструкции разрушенных памятников архитектуры // Археология и геоинформатика. – Москва, 2020. – Вып. 9. – С. 78-85.

11. Рузиев М.А. Проблемы сохранения объектов культурного наследия в условиях экологического кризиса Приаралья // Вестник Каракалпакского отделения АН РУз. – Нукус, 2019. – № 2. – С. 34-41.

12. Forte M. Cyber-Archaeology and Grand Narratives. – New York: Springer, 2018. – 245 p.

13. Minardi M. Ancient Chorasmia: A Polity Between the Semi-Nomadic and Sedentary Cultural Areas of Central Asia. – Leuven: Peeters, 2015. – 340 p.

14. Remondino C., Rizzi A. 3D Technologies for Cultural Heritage: Current State and Perspectives // Journal of Cultural Heritage. – Paris, 2021. – Vol. 48. – P. 13-24.

15. Smith J.L., Brown A. Artificial Intelligence and Machine Learning in Archaeological Site Reconstruction // Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage. – London, 2022. – Vol. 24. – P. 55-67.