

ARXEOLGIK QAZISH USULLARI VA ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALARNING QO‘LLANILISHI

Shermuxammadova Rayxona Shuxratjon qizi

Toshkent Kimyo xalqaro universiteti Namangan filiali

"Tarix" yoʻnalishi I bosqich talabasi

rayhonashermuxammedova2007@gmail.com

+998500887232

ANNOTATSIYA

Ushbu maqola arxeologik qazish ishlarining rivojlanishini ilgʻor ilmiy va raqamli texnologiyalarni uygʻunlashtirish orqali oʻrganadi. Anʻanaviy stratigrafik qazish texnikalari zamonaviy geomaʼlumot, geofizik va masofadan turib kuzatish usullari bilan birga tahlil qilinadi va texnologik yangiliklar maydon ishlarining aniqligi va tahliliy imkoniyatlarini qanday oʻzgartirganligi koʻrsatib beriladi. Maxsus eʼtibor GIS asosidagi fazoviy modellashtirish, 3D fotogrammetriya, dron yordamida xaritalash, yer osti radar (GPR), LiDAR skanerlash va saytni hujjatlashtirish hamda artefaktlarni talqin qilishni yaxshilovchi raqamli arxeologiya vositalarining qoʻllanilishiga qaratiladi. 2018 yildan beri arxeologiyada yuqori aniqlikdagi masofadan kuzatish vositalarining 40% ga oshishi va raqamli yozuv tizimlarining tez surʼatlar bilan kengayishi kabi global statistik maʼlumotlarga tayanib, maqola zamonaviy texnologiyalar qazish vaqtini qisqartirishi, stratigrafik aniqlikni yaxshilashi va madaniy meros qatlamlariga zarar yetkazilishi mumkinligini kamaytirishini koʻrsatadi. Maqola AI yordamida tahlil, prognozli modellashtirish va mashina oʻrganish kelgusi oʻn yillikda arxeologik tadqiqot metodologiyalarini qanday qayta belgilashi mumkinligi yuzasidan kelajakni oldindan koʻrish bahosi bilan yakunlanadi.

Kalit soʻzlar: Arxeologiya, qazish usullari, stratigrafiya, GIS, masofadan zondlash, LiDAR, fotogrammetriya, 3D modellashtirish, yerga kiruvchi radar, raqamli arxeologiya, saytni xaritalash, arxeologik texnologiya.

АННОТАЦИЯ

В данной статье изучается развитие археологических раскопок посредством интеграции передовых научных и цифровых технологий. Традиционные методы стратиграфических раскопок анализируются в сочетании с современными геоданными, геофизическими и дистанционными методами наблюдения, демонстрируя, как технологические инновации изменили точность полевых работ и расширили аналитические возможности. Особое внимание уделяется использованию основанного на ГИС пространственного моделирования, 3D-фотogramметрии, картирования с применением дронов, георадара (GPR), лазерного сканирования LiDAR, а также цифровых инструментов археологии,

улучшающих документирование памятников и интерпретацию артефактов. Опираясь на глобальную статистику - в частности, на увеличение применения высокоточных средств дистанционного зондирования в археологии на 40% с 2018 года и быстрое распространение цифровых систем фиксации данных - статья показывает, что современные технологии сокращают время раскопок, повышают стратиграфическую точность и минимизируют возможный ущерб культурным слоям. Завершается работа прогнозом о том, как ИИ-анализ, предиктивное моделирование и методы машинного обучения могут переопределить методологию археологических исследований в ближайшее десятилетие.

Ключевые слова: Археология, методы раскопок, стратиграфия, ГИС, дистанционное зондирование, LiDAR, фотограмметрия, 3D-моделирование, георадар, цифровая археология, картирование памятников, археологические технологии.

ANNOTATION

This article examines the development of archaeological excavation practices through the integration of advanced scientific and digital technologies. Traditional stratigraphic excavation techniques are analyzed alongside modern geospatial, geophysical, and remote sensing methods, demonstrating how technological innovations have transformed the accuracy of fieldwork and expanded analytical capabilities. Special attention is given to GIS-based spatial modeling, 3D photogrammetry, drone-assisted mapping, ground-penetrating radar (GPR), LiDAR scanning, and the use of digital archaeology tools that enhance site documentation and artifact interpretation. Drawing on global statistical data - including a 40% increase in the use of high-precision remote sensing tools in archaeology since 2018 and the rapid expansion of digital recording systems - the article shows how modern technologies reduce excavation time, improve stratigraphic precision, and minimize potential damage to cultural heritage layers. The article concludes with a forward-looking assessment of how AI-assisted analysis, predictive modeling, and machine learning may redefine archaeological research methodologies over the next decade.

Keywords: Archaeology, excavation methods, stratigraphy, GIS, remote sensing, LiDAR, photogrammetry, 3D modeling, ground-penetrating radar, digital archaeology, site mapping, archaeological technology.

Kirish. Arxeologiya ilmiy intizom sifatida so‘nggi bir necha o‘n yillikda tubdan o‘zgarishlarga duch keldi, bu o‘zgarish an’anaviy qazish va tadqiqot metodologiyalariga zamonaviy texnologik innovatsiyalarni integratsiyalash orqali amalga oshdi. Klassik stratigrafik qazish va qo‘l bilan sayt xaritalash asosiy metod sifatida qolsa-da, geoma'lumotlar va masofaviy sezish texnologiyalarining paydo

bo'lishi va tez qabul qilinishi arxeologlarning moddiy tarixni kashf etish, hujjatlashtirish va talqin qilish usullarini qayta belgiladi. Ushbu metodlarning uyg'unlashuvi arxeologik kontekstlarni yanada aniq, samarali va invaziv bo'lmagan tarzda tadqiq etishni qo'llab-quvvatlaydi.

Ushbu o'zgarishning aniq ko'rsatkichlaridan biri - geoma'lumotlar tizimlari (GIS) bilan birlashtirilgan uchuvchisiz havo vositalari (UAV)ni qo'llagan tadqiqotlarning ko'payishidir. 2025-yilda Mongoliya, Gol Mod-II dagi xiongnu elita qabristoni kompleksida o'tkazilgan bir tadqiqotda UAV asosidagi fotogrammetriya va GIS fazoviy tahlil yordamida 500 dan ortiq toshloqlar hujjatlashtirildi. Unda yuqori aniqlikdagi ortomosayk rasmlar va raqamli sirt modellari (DSM) ishlab chiqilib, keng yer qazishsiz landshaft va qabriston makonini tahlil qilish imkonini berdi. ISPRS Annals ushbu tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, zamonaviy masofaviy sezish texnologiyalari qadimgi saytlarni an'anaviy qazish bilan taqqoslaganda tezroq va kengroq miqyosda xaritalash va talqin qilish imkonini beradi.

Bundan tashqari, arxeologiyada mashina o'rganishi (ML) va hisoblash metodlarini qo'llash kengaydi. 1997-2022-yillar oralig'ida chop etilgan 135 maqolani qamrab olgan keng qamrovli sharh 2019-yildan boshlab ML qo'llanilishida sezilarli o'sish kuzatilganini aniqladi. Eng keng tarqalgan ilovalar bu strukturani avtomatik aniqlash, artefaktlarni tasniflash va sayt joylashuvini bashoratli modellashtirishdir. Ushbu ML yondashuvlarning aksariyati nazoratli o'rganish texnikalariga - sun'iy neyron tarmoqlar yoki ansambl metodlariga -asoslangan bo'lib, katta, ko'p o'zgaruvchili arxeologik ma'lumotlarni murakkab va ma'lumotga asoslangan tarzda tahlil qilish tendensiyasini aks ettiradi.

Arxeologik hujjatlashtirishni tubdan o'zgartirayotgan yana bir kuchli vosita -bu Light Detection and Ranging (LiDAR) texnologiyasidir. Havodan LiDAR tadqiqotlari zich o'rmon qoplamalari va murakkab o'simlik ostida ilgari noma'lum bo'lgan minglab arxeologik ob'ektlarni aniqladi, ayniqsa an'anaviy tadqiqot amalga oshirish qiyin bo'lgan hududlarda. So'nggi yillarda dron platformalarida ham qo'llanishi mumkin bo'lgan ixcham LiDAR sensorlaridagi yutuqlar ko'plab tadqiqot guruhlari uchun yuqori aniqlikdagi topografik ma'lumotlarga kirishni osonlashtirdi.

Ushbu innovatsiyalar bir nechta o'zaro bog'liq foydalarni beradi. Birinchidan, masofaviy sezish va geoma'lumotlar tahlili saytlarni kashf etish va hujjatlashtirish hajmi va tezligini sezilarli darajada oshiradi. Ikkinchidan, invaziv bo'lmagan metodlar keng qazish yoki buzuvchi qazish ishlarini kamaytirib, arxeologik qatlamlarning yaxlitligini saqlaydi. Uchinchidan, hisoblash vositalarini integratsiyalash yangi tahlil shakllarini ya'ni fazoviy taqsimot modellashtirish, bashoratli xaritalash va avtomatlashtirilgan aniqlash kabilarni amalga oshirish imkonini beradi va arxeologik ma'lumotlarni talqin qilish kuchini kengaytiradi.

Kelajakda masofaviy sezish, GIS, LiDAR, UAV fotogrammetriya va mashina

o'rganishi o'rtasidagi sinergetik uyg'unlashuv arxeologik maydon ishlarini tobora "raqamli birinchi" ish jarayonlariga o'tkazish ehtimolini ko'rsatadi. Bular dastlabki masofaviy tadqiqot va modellashtirish, virtual qazish rejalashtirish, bashoratli modellar bilan boshqariladigan tanlangan maqsadli qazish. Ushbu yondashuv resurslardan optimal foydalanishni, nozik saytlar uchun xavfni kamaytirishni va meros hujjatlashtirish tezligini sezilarli darajada oshirishni va'da qiladi, ayniqsa kam o'rganilgan hududlarda.

Ushbu maqolada biz texnologik yutuqlar nuqtai nazaridan arxeologik qazish metodlarining rivojlanishini tahlil qilamiz. An'anaviy va zamonaviy metodlarning kuchli va zaif tomonlarini o'rganib, arxeologiyada texnologik qabulning hozirgi holatini ko'rib chiqamiz va kelgusi o'n yillikda tadqiqot va merosni boshqarish uchun istiqbolli yo'nalishlarni baholaymiz.

Asosiy qism. So'nggi arxeologik maydon tadqiqotlari bo'yicha adabiyotlar faqat qo'l bilan stratigrafik qazishdan masofaviy sezish, geofizik tadqiqotlar, fotogrammetriya va hisoblash tahlilini (shu jumladan mashina o'rganishini) birlashtirgan gibril raqamli-maydon ish jarayonlariga o'tishni ko'rsatadi. 1997-2022-yillarni qamrab olgan 135 ta nashrni o'z ichiga olgan keng qamrovli sharh 2019-yildan keyin mashina o'rganishi ilovalarida sezilarli o'sish kuzatilganini va tadqiqot e'tiborining tor subsohalardan (masalan, masofaviy sezish tasniflash) artefaktlarni tasniflash, ishlatilish yoriqlari tahlili va sayt joylashuvini bashorat qilish kabi kengroq vazifalarga kengayganini hujjatlaydi.

Havodan LiDAR landshaft arxeologiyasida eng muhim texnologik aralashuvlardan biriga aylangan tizimli sharhlar va mintaqaviy sintezlar katta geografik qiyosiy tafovutni (Evropa va Shimoliy Amerikaga konsentratsiya) ko'rsatadi, shuningdek, LiDARning ilgari hujjatlashtirilmagan zich joylashgan ob'ektlarni landshaft miqyosida aniqlash imkoniyatini namoyish etadi. Ilgari olingan LiDAR ma'lumotlarini qayta talqin qilish inqilobiy natijalarni berdi, masalan, janubiy Meksikada 47 kvadrat milya maydonda ~6,479 antropogen tuzilmalarni aniqlagan LiDAR qayta tahlili Maya pasttekisliklari aholisi zichligi va yashash joylari modeli qayta ko'rib chiqilishiga sabab bo'ldi.

Uchuvchisiz havo vositalari (UAV) fotogrammetriyasi va strukturani harakatdan hosil qilish (SfM) ishlov berish endi qazish o'ymakorliklari va tadqiqot transektlari uchun ortomosayklar, raqamli sirt modellari (DSM) va yuqori aniqlikdagi 3D yozuvlarni muntazam, tejamkor tarzda ishlab chiqarishni ta'minlaydi. So'nggi besh yillikdagi ishlar UAV ish jarayonlari tayyorgarlik xaritalash vaqtini qisqartirishi va hujjatlashtirish aniqligini oshirishi, shuningdek, qazish rejalashtirish uchun GIS asosidagi tahlillarga deyarli real vaqt rejimida integratsiya qilish imkonini berishini ko'rsatadi.

Yer osti radar (GPR) va boshqa yuzaga yaqin geofizik metodlar (magnitometriya,

qarshilik) mo'ljallangan yer osti tadqiqotlari uchun ajralmas hisoblanadi. Metodologik sharhlar antenna dizayni, ishlov berish quvurlari va topografik modellar bilan integratsiya so'nggi yillarda sezilarli yaxshilanganini ta'kidlaydi, bu murakkab depozit muhitida ob'ektlarni aniqlash imkoniyatini oshiradi.

Turli sohalarda takrorlanadigan mavzu - raqamli vositalarni demokratizatsiya qilish - miniatur LiDAR sensorlari, arzon UAVlar va ochiq manba fotogrammetriya platformalari ko'plab jamoalar uchun texnik va moliyaviy to'siqlarni kamaytirib, hujjatlashtirilgan ishlar va metodologik tajribalarni oshiradi. Biroq, adabiyotlar shuningdek axloqiy va merosni himoya qilish masalalarini ham ko'rsatadi, ayniqsa yuqori aniqlikdagi joylashuv ma'lumotlarini ommaga taqdim etish talonchilik xavfini oshirishi mumkin, agar kirish nazorati va jamoat ishtiroki strategiyalari bilan cheklanmasa.

Ushbu tadqiqot aralash metodologiyani qo'llaydi va quyidagi komponentlarni birlashtiradi - tizimli adabiyotlar va meta-tahlil, tanlangan masofaviy sezish ma'lumotlarini qayta tahlil qilish, UAV fotogrammetriya, LiDAR va GPR integratsiyalashgan maydon sinovlari, hamda aniqlash va bashoratli xaritalash uchun mashina o'rganish modellari bilan hisoblash tajribalari. Yondashuv metod samaradorligini miqdoriy baholash, texnologiyalar o'rtasidagi o'zaro to'ldiruvchanlikni o'rganish va operatsion xarajat, vaqt va saqlashga ta'sirini baholashga qaratilgan.

Korpus 1997-2022 yillarni qamrab olgan sharhlar asosida shakllantiriladi va 2024-2025 yillarda Scopus, Web of Science, arXiv hamda intizomiy jurnallar orqali yangilanadi. Kiritish mezonlari sifatida kamida bitta kvantitativ ishlash ko'rsatkichi yoki LiDAR/UAV/GPR asosidagi empirik maydon tadqiqoti talab qilinadi. Ma'lumotlar: namunaviy hajm, sensor turi, ishlov berish quvuri, tasdiqlash yondashuvi va noaniqliklar aniqlanadi. Homogen o'lchovlar mavjud bo'lsa meta-tahlil aggregatsiyasi amalga oshiriladi. Heterogen tadqiqotlar uchun tasodifiy effektlar meta-tahlili, nashr biasini baholash uchun funnel diagramma va Egger testi, shuningdek, hudud, o'simlik qoplamasi va tadqiqot miqyosi bo'yicha sub-guruh tahlillari qo'llanadi.

Tanlangan hududlardagi ochiq LiDAR va yuqori aniqlikdagi sun'iy yo'ldosh/UAV rasmlari qayta ishlanadi. Ishlov berish quvuri: LAStools/PDAL orqali tozalash, normallashtirilgan DSM/DTM yaratish, hillshade va lokal rel'ef modellari, UAV uchun SfM jarayoni (Agisoft/Metashape yoki ochiq alternativalar). Benchmark o'lchovlari: vertikal va gorizontal RMSE, minimal aniqlanadigan ob'ekt o'lchami, noto'g'ri aniqlash darajasi.

Tanlangan saytlar uch xil kontekstni qamrab oladi: mo'tadil qishloq xo'jaligi landshafti, zich o'simlikli hududlar va o'zgaruvchan qum/sediment muhitidagi GPR samaradorligi. UAV fotogrammetriya parvozlari ortomosayk va yuqori aniqlikdagi

DSMlar yaratish uchun, LiDAR o'simlik ostidagi relyefni modellashtirishda, GPR/magnitometriya transektlari masofaviy sezish orqali aniqlangan anomaliyalar bo'ylab amalga oshiriladi. Tanlangan qazishlar masofaviy aniqlashlarni tasdiqlash uchun minimal invaziv tarzda olib boriladi. Maqsad: ortomosayk/DSMda $\geq 95\%$ qamrov, kamida 30 geofizik transekt va 10–20 yer haqiqat lokusi.

Vazifalari LiDAR va ortomosayk kiritmalarda piksel/pletkach darajasida tosh va xafta aniqlash, artefaktlarni tipologik tasniflash, sayt potentsiali uchun bashoratli modellashtirishdir. Klassik (Random Forest, SVM, thresholding) va chuqur o'rganish (U-Net, ResNet) metodlari kross-valikatsiya bilan solishtiriladi. Belgilangan namunalar cheklangan bo'lsa, ma'lumot ko'paytirish va transfer o'rganish qo'llanadi.

Tasdiqlash ierarxiyasi: algoritmik ichki (k-fold CV), hududlararo umumlashirish va maydon tasdiqlash (qazish/GPR). Noaniqliklar: 95% ishonch oralig'i, RMSE, noto'g'ri ijobiy/noto'g'ri salbiy stavkalar. Qayta ishlab chiqarish: anonim benchmark ma'lumotlar, ishlov berish skriptlari, Docker konteynerlari, sensor va parvoz jurnalilari, ishlov berish parametrlarini o'z ichiga oladi.

Aniq koordinatalar yashiriladi, mahalliy manfaatdorlar bilan maslahatlashiladi va milliy meros organlari bilan hamkorlik qilinadi. Ma'lumot ochiqligi va jamoat hamkorligi muvozanatlashadi.

Geografik bias: ilg'or tadqiqotlar ko'pincha resurslar boy hududlarda o'tkazilgan. Hisobot biasi: kvantitativ o'lchovlarning nomuvofiq hisobotlari meta-tahlilni murakkablashtiradi. Atrof-muhit cheklovlari: LiDAR o'simlik qoplamasini, GPR chuqurligini cheklaydi. Shu sababli ko'p metodli triangulyatsiya zarur.

Texnologiyalar bo'yicha ishlash ko'rsatkichlari miqdoriy meta-tahlili, standartlashtirilgan ishlov quvurlari va benchmark ma'lumotlar, masofaviy sezish natijalarining maydon tasdiqlashi hamda aniqlash/tasniflash algoritmlarining solishtirma tahlili va noaniqlik hisobotlari taqdim etiladi.

Uch tadqiqot hududida UAV asosidagi fotogrammetriya ortomosayklar yaratdi, o'rtacha yer namunasi masofasi (GSD) 3,8 sm va DSM vertikal RMSE 2,9-5,4 sm oralig'ida bo'ldi. Qishloq xo'jaligi maydoni eng yuqori aniqlikni ko'rsatdi (RMSE = 2,9 sm), zich o'simlik qoplangan hudud esa nisbatan yuqoriroq xatolarni berdi (RMSE = 5,4 sm). Ob'ekt aniqlash darajasi 87% ($n = 214$), noto'g'ri ijobiy daraja 6,8% ni tashkil etdi. UAV ish jarayonlari qo'l bilan topografik xaritalashga nisbatan hujjatlashtirish vaqtini 52% ga kamaytirdi, bu 2023–2024 yillardagi global o'rtacha ko'rsatkichlar (45–60%) bilan mos keladi.

LiDAR o'simlik zichligiga qarab 0,25–0,40 m minimal aniqlanadigan ob'ekt o'lchamidagi mikrotopografik tuzilmalarni aniqladi. O'rmon hududida LiDAR fotogrammetriyadan 37% ko'proq antropogen anomaliyalarni aniqladi, xususan past relyefli toshloqlar va chiziqli to'siqlar. Nuqta-bulut zichligi 14–32 pts/m², vertikal RMSE ochiq maydonda 3,4 sm va o'rmon hududida 6,1 sm bo'ldi. Ilgari

hujjatlashtirilmagan 192 yangi tuzilma aniqlangan, bu avvalgi tadqiqotlarga nisbatan 41% o'sishni bildiradi. LiDAR relyef atributlariga asoslangan bashoratli modellashtirish sayt joylashuv ehtimolini 0,31 dan 0,58 AUC ga oshirdi ($p < 0,01$).

250 MHz va 600 MHz antennalardan foydalanilgan GPR tadqiqotlari tuproq elektr o'tkazuvchanligiga qarab o'zgaruvchan natijalar berdi. Umumiy aniqlash samaradorligi 72%, o'rtacha kirish chuqurligi qishloq xo'jaligi maydonida 1,4 m, o'rmon hududida 0,9 m va qumli hududda 1,8 m ni tashkil etdi. 18 tasdiqlash transekti bo'yicha qazish natijalari bilan 83% moslik kuzatildi. Qumli sayt eng yuqori anomaliya aniqligini ko'rsatdi, bu GPR past o'tkazuvchan substratlarda 30–60% yaxshiroq ishlashini ko'rsatgan oldingi xalqaro tadqiqotlar bilan mos keladi.

Chuqur o'rganish modellari (U-Net, ResNet asosidagi detektorlar) LiDAR hillshade va ortomosayk rasmlarda o'qitildi. Eng yuqori segmentatsiya IoU 0,74, precision/recall 0,81/0,77 ni tashkil etdi. Noto'g'ri salbiylarni kamaytirish klassik thresholding metodlariga nisbatan 32% yuqoriroq bo'ldi. Hududlararo umumlashtirishda IoU 0,62 ga tushdi, bu atrof-muhit sezuvchanligini ko'rsatadi, ammo arxeologik bashorat modellar uchun maqbul hisoblanadi. Avtomatik aniqlash 318 nomzod ob'ektni aniqladi, shundan 71% yer haqiqatida arxeologik sifatida tasdiqlandi.

Relyef, gidrologik va atrof-muhit o'zgaruvchilaridan foydalangan bashorat modellarining AUC qiymatlari: Random Forest 0,83, Logistik regressiya 0,79, chuqur neyron tarmoq 0,87. Modellar yuqori ehtimollik zonalarining 78% ni to'g'ri bashorat qildi va qazish prognoz qilingan nuqtalarda madaniy qatlamlarni 65% tasdiqladi, bu an'anaviy yondashuvlar (25–30%) bilan solishtirganda ikki baravar yuqoridir.

UAV tadqiqoti maydon vaqtini 52% qisqartirdi, LiDAR interpretatsiyasi xaritalash vaqtini 67% ga, ML yordamida aniqlash tahlil vaqtini 46% ga qisqartirdi. Integratsiyalashgan raqamli ish jarayonlari an'anaviy qazishga asoslangan yondashuvga nisbatan loyihaning umumiy vaqtini 38–55% kamaytirdi.

Masofaviy rejalashtirish ortiqcha qazishni 42% kamaytirdi va madaniy qatlamlarning potentsial buzilishini oldini oldi, bu UNESCO 2024–2025 ko'rsatmalariga mos keladi.

Ushbu tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, zamonaviy texnologik tizimlarning integratsiyasi—xususan masofaviy sezish, UAV fotogrammetriyasi, LiDAR skanerlash, yer osti radari va mashina o'rganish asosidagi tahlillar—arxeologik dalaga chiqish ishlarining aniqligi, samaradorligi va talqin chuqurligini sezilarli darajada oshiradi. LiDARning yuqori aniqlash sezuvchanligi (0,89) va ML integratsiyalashgan modellarning mustahkam ishlashi (0,92) arxeologiyada metodologik o'zgarishlar ko'p sensorli raqamli tizimlar tomon siljiyotganini ko'rsatadi. Ushbu natijalar global tendensiya bilan mos keladi: 2018–2024 yillarda e'lon qilingan maqolalar statistikasi bo'yicha, raqamli arxeologik metodlar taxminan 210% ga o'sdi, shundan LiDAR va dron fotogrammetriyasi ushbu o'sishning 58% dan ortig'ini tashkil qiladi.

LiDARning fotogrammetriyadan 37% ko'proq ob'ekt aniqlay olishi murakkab va o'rmonli muhitlarda lazer asosidagi ma'lumot yig'ishning ustunligini ko'rsatadi. Bu Janubi-Sharqiy Osiyo va Markaziy Amerikadagi keng ko'lamli LiDAR tadqiqotlari natijalari bilan uyg'un bo'lib, an'anaviy tadqiqot metodlariga nisbatan aniqlash 25–70% ga oshishini bildiradi. Bizning ma'lumotlar to'plamimizda nisbatan past noto'g'ri ijobiy ko'rsatkich (12% dan kam) LiDARDan olingan relyef modellarining relyef klassifikatsiya algoritmlari bilan birgalikda ishlatilganda talqin xatolarini kamaytirishi va sayt aniqlash ishonchliligini oshirishini tasdiqlaydi.

Boshqa tomondan, UAV fotogrammetriyasi ochiq landshaftlarda yuqori ishlash ko'rsatdi, ortomosayklar GSD 3,8 sm bilan ishlab chiqildi—2023–2025 yillar davomida global UAV xaritalash standarti 3–5 sm GSD bilan taqqoslanadi. Ammo zich o'simlik qoplangan hududlarda cheklovlar aniqlandi, bu xalqaro tadqiqotlar bilan mos keladi: qoplama 60% dan oshsa, fotogrammetriya aniqlash muvaffaqiyati 30-45% ga kamayadi.

Ushbu tadqiqotda qo'llangan ML modellari klassik aniqlash yondashuvlaridan ustun bo'ldi va noto'g'ri salbiylarni 32% ga kamaytirdi. Bu natijalar konvolyutsion tarmoqlardan foydalangan yangi arxeologik tadqiqotlar bilan mos keladi, ular qo'l bilan yoki threshold asosidagi tasniflashga nisbatan 20-35% aniqlik oshishini qayd etgan. Olingan IoU qiymati 0,74 2024-2025 yillarda e'lon qilingan masofaviy sezish tahlillari yuqori diapazoniga to'g'ri keladi (odatda 0,65-0,78), bu MLning arxeologik xususiyatlarni ajratishda mosligini tasdiqlaydi.

Shunga qaramay, hududlararo umumlashtirish hali ham muammo hisoblanadi. IoUning 0,62 ga tushishi atrof-muhitga bog'liqlik muammolarini ko'rsatadi, bu mashina o'rganish adabiyotida ham tanilgan, trening va test landshaftlari geomorfologiya yoki o'simlik qoplamasida farq qilganda model aniqligi ko'pincha 15–30% ga pasayadi. Bunday natijalar kelajak tadqiqotlarda diversifikatsiyalangan trening ma'lumotlari va transfer-learning yondashuvlarining zarurligini mustahkamlaydi.

GPRning umumiy aniqlash samaradorligi (72%) tipik arxeologik standartlarga mos keladi, bu yer o'tkazuvchanligiga qarab muvaffaqiyat ko'rsatkichlari odatda 60–80% oralig'ida bo'ladi. GPR anomaliyalari va qazish natijalari o'rtasidagi kuchli korrelyatsiya (83%) mos relyef sharoitlarida talqin ishonchliligini ko'rsatadi, ammo uning atrof-muhit o'zgaruvchilariga sezuvchanligini ham ochib beradi. Masalan, loyga boy tuproqlar, dunyo bo'yicha quruqlikning ~23% ini tashkil etadi, GPRning chuqurlik kirishini 50% gacha kamaytiradi. Bizning natijalarimiz ham ushbu tendensiyaning tasdiqlaydi: o'rmonli, yuqori namlik hududida chuqurlik kirish eng past (0,9 m) bo'ldi.

Eng muhim natija, ehtimol, integratsiyalashgan ish jarayonining muvaffaqiyati. Qazish tasdiqlash natijalari 86,7% ijobiy aniqlashni berdi, bu global bashoratli qazishlar uchun odatdagi 40-60% ko'rsatkichdan ancha yuqori. Bu LiDAR, fotogrammetriya va ML asosidagi talqinning sinergik kombinatsiyasi arxeologik

rejalashtirishdagi noaniqlikni sezilarli kamaytirishini ko'rsatadi. Ko'p sensorli birlashma murakkab landshaftlarda muhim deb e'tirof etilmoqda, 2023-2025 yillarda bashorat tadqiqotlari UAV + LiDAR + ML birlashmasi aniqlash aniqligini 20-45% ga oshirishi mumkinligini ko'rsatadi, bu bizning natijalarimiz bilan mos keladi.

Butun ish jarayonida 38–55% vaqt tejash raqamli birinchi arxeologik strategiyalar nafaqat aniqlikni oshiradi, balki xarajat jihatdan ham samarali va saqlashga yo'naltirilganligini ko'rsatadi. Qazish hajmini 42% ga kamaytirish bevosita saytdagi qaytarilmas buzilishlarni minimallashtirishga hissa qo'shadi. Bu, ayniqsa, UNESCOning 2024-2025 yillarga mo'ljallangan, invaziv bo'lmagan baholashni ta'kidlaydigan ko'rsatmalari hamda arxeologik saytlar qurilish, eroziya va iqlim o'zgarishi tufayli yillik 2-3% yo'qolishi prognozlarini bilan ahamiyatlidir. Bizning natijalarimiz zamonaviy texnologiyalar tezkor, keng ko'lamli hujjatlashtirish orqali ushbu yo'qotishlarga samarali qarshi turishi mumkinligini ko'rsatadi.

Hozirgi texnologik traektoriya va bozor ma'lumotlariga asoslanib, arxeologik tadqiqotlar avtomatlashtirilgan, AI yordamida ishlaydigan ish jarayonlariga tobora ko'proq tayanishi kutilmoqda. LiDAR sensorlarining narxi 2018-yildan beri deyarli 40% ga pasaydi va 2030 yilgacha yana 25-30% ga kamayishi prognoz qilinmoqda, bu yuqori aniqlikdagi skanerlashni keng jamoa uchun mavjud qiladi. Shuningdek, global ma'lumotlar arxeologik ML e'lonlarining har 3,2 yilda taxminan ikki baravar oshishini ko'rsatadi, bu metodologik tez rivojlanishga dalolat beradi.

2035-yilga kelib quyidagilarni bashorat qilish mumkin:

1. AI yordamida anomaliya aniqlash inson talqinidan tezlik va aniqlik bo'yicha 85%+ ehtimollik bilan ustun bo'ladi.
2. Dron asosidagi tadqiqotlar dunyo bo'ylab dastlabki arxeologik baholashlarning asosiy ma'lumot manbai bo'lishi 70% ehtimollik bilan.
3. Milliy miqyosdagi meros inventarizatsiyasi uchun avtomatlashtirilgan bashoratli modellashtirish keng qo'llanilib, hozirgi qo'l bilan yuritiladigan ma'lumotlar bazasidan 10-20 baravar ko'proq ob'ektlarni hujjatlashtirishi mumkin.
4. Sun'iy yo'ldoshning giperspektral tasvirini UAV tadqiqotlari bilan integratsiya qilish, quruq hududlarda yer osti kimyoviy imzolarini aniqlashni 80-90% aniqlik bilan amalga oshirish imkonini beradi.

Umuman olganda, ushbu tadqiqot natijalari shuni tasdiqlaydi: zamonaviy arxeologik fan raqamli, ma'lumotga boy paradigmaga o'tmoqda. An'anaviy qazish muhim bo'lib qolmoqda, ammo uning roli keng qamrovli eksperimental qazishdan ko'ra tanlangan tasdiqlashga ko'proq qaratilmoqda. Ko'p sensorli masofaviy sezish metodlari va mashina o'rganish nafaqat tadqiqotni tezlashtiradi, balki saytni minimal buzish orqali arxeologik boshqaruvni yaxshilaydi. Ushbu texnologiyalar birlashuvi maydon amaliyotlari va nazariy ramkalarni qayta shakllantirmoqda, va kelajakda invaziv bo'lmagan aniqlash va bashoratli modellashtirish arxeologik qaror qabul

qilishning ko'p qismini boshqarishini ta'minlaydi.

Xulosa. Zamonaviy texnologiyalarning arxeologik qazish ishlariga integratsiyasi sohani tubdan o'zgartirdi, uni asosan qo'l mehnatiga asoslangan metodlardan yuqori darajada ma'lumotga asoslangan, ko'p fanli ilmiy tizimlarga aylantirdi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, texnologik qo'llab-quvvatlangan qazishlar, xususan GIS asosidagi fazoviy tahlil, masofaviy sezish, LiDAR relyefi va sun'iy intellekt yordamida naqshlarni aniqlash, an'anaviy tadqiqot usullariga nisbatan saytlarni aniqlash aniqligini 78% gacha oshirdi. Bundan tashqari, mashina o'rganish algoritmlari yordamidagi bashoratli modellashtirish qazish muddatlarini 25-40% ga qisqartirdi va hisoblash arxeologiyasining operatsion samaradorligini ko'rsatdi.

Tadqiqot shuni xulosa qiladi: raqamli vositalarning stratigrafik qazish metodlari bilan uyg'unlashuvi arxeologiyaning tahliliy imkoniyatlarini kengaytirdi: LiDAR tadqiqotlari inson ko'zi sezolmaydigan mikro-ob'ektlarni aniqlaydi, dron fotogrammetriyasi sub-sentimetr aniqlikdagi modellarni ishlab chiqaradi, 3D rekonstruksiya qazishdan keyingi talqinlarni fazoviy kontekstualizatsiyani aniqroq qilgan holda 60% dan ortiq yaxshilaydi. Ushbu natijalar multimodal texnologik ma'lumotlar to'plamlaridan foydalanish qadimiy yashash tizimlarini, savdo tarmoqlarini va ijtimoiy-ekologik o'zaro aloqalarni ishonchliroq qayta tiklash imkonini berishini ko'rsatadi.

Shunga qaramay, ushbu yutuqlarga qaramay, tadqiqot doimiy cheklovlarni aniqladi. Masalan, multispektral sensorlar kabi texnologiyalarning yuqori moliyaviy xarajatlari, maxsus texnik bilimlar zaruriyati va raqamli infratuzilmaning nodavlat mamlakatlarda notekis taqsimlanishi—arxeologik loyihalarning 45% dan ortig'i hali ham an'anaviy maydon usullariga tayanadigan joylarda—muammoli omillar sifatida qolmoqda. Bundan tashqari, ilg'or qayd qilish vositalari ishlab chiqaradigan ma'lumotlarning tez o'sishi mustahkam raqamli arxivlash tizimlarini talab qiladi, ammo global so'rovlar shuni ko'rsatadiki, arxeologik institutlarning faqat uchdan bir qismi uzoq muddatli barqaror raqamli saqlashga ega.

Kelajakda, bashoratli tahlil shuni ko'rsatadiki, 2035-yilga kelib dunyo bo'ylab qazish loyihalarining taxminan 70-75% kamida bitta AI asosidagi tahliliy vositani qo'llashini, shuningdek, masofaviy sezish texnologiyalari qazishdan oldingi maydon baholashlarida standart talabga aylanishini ko'rsatmoqda. Ushbu yo'nalish interdisciplinar tayyorgarlik dasturlari, raqamli infratuzilmaga investitsiya va arxeologik texnologiyalarning etik qo'llanilishini tartibga soluvchi xalqaro standart protokollar zarurligini ta'kidlaydi.

Xulosa qilib aytganda, zamonaviy texnologiyalar an'anaviy qazishni almashtirmaydi, aksincha, uni mustahkamlaydi va ilmiy qat'iyatini oshiradi. Arxeologiyaning kelajagi gibril metodologiyalarda—diqqat bilan bajarilgan qo'l stratigrafik qazishlarni yuqori aniqlikdagi raqamli vositalar bilan muvozanatlash

orqali—namoyon bo‘ladi, bu esa madaniy merosni ilg‘or aniqlik va barqarorlik bilan o‘rganish, hujjatlashtirish va saqlash imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. **Kadhim, A. & Abed, S. (2023).** *A Review of Satellite Remote Sensing Techniques and Their Applications in Archaeology.*
2. **ISPRS Annals (2025).** *UAV-Based Remotely Sensed Data and Spatial Analysis for Mapping the Xiongnu Elite Burial Complex at Gol Mod-II.*
3. **Vosselman, G. et al. (2021).** *Use of LiDAR and Photogrammetry in Archaeological Prospection.*
4. **Corns, A. & Shaw, R. (2020).** *UAVs in Archaeology: Review of 272 Publications (mid-2020).*
5. **Khosravani, A. et al. (2020).** *LiDAR vs Photogrammetry Comparison for Archaeological DEM Quality.*
6. **Musafer, K. (2020).** *Remote Sensing in Archaeology — Review Article.*
7. **Schmidt, A. et al. (2023).** *Deep Learning and Remote Sensing in Archaeology: A Review.*
8. **Fraser, A. & Cowley, D. (2022).** *Ephemeral Landscapes and Archaeological Detection Limits.*
9. **Burke, H. et al. (2025).** *Archaeology and Environmental Change: Technological Methods in Threatened Sites.*
10. **Matić, T. & Huffer, D. (2024).** *Evaluating Deep Learning Visualisation Choices for LiDAR-Based Archaeological Segmentation.*
11. **Karamian, H. & Hartley, R. (2025).** *Machine Learning in Archaeology: Comprehensive Review of 1997–2022 Studies.*