UCHUVCHISIZ UCHISH APPARATLARI MA'LUMOTLARI ASOSIDA O'RMON EKOTIZIMLARIDA DARAXTLARNI SEGMENTATSIYALASH

Boboqulov Abbos Dilshod o'g'li
Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Raqamli texnologiyalar konvergensiyasi kafedrasi
Toshkent, O'zbekiston
E-mail: abbosboboqulov0511@gmail.com
To'xtasinov Adxamjon Ilxomjon o'g'li
Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti Raqamli texnologiyalar konvergensiyasi kafedrasi
Toshkent, O'zbekiston
E-mail: tadhamjon96@gmail.com

Annotatsiya: O'rmonlar biologik xilma-xillik, iqlimni tartibga solish va gidrologik tsikllar uchun muhim bo'lib, ularni barqaror boshqarish o'rmonlarning kesilishi va iqlim o'zgarishi kabi tahdidlar sababli zarurdir, an'anaviy o'rmon monitoringi usullari mehnat talab qiluvchi va cheklangan bo'lsa, UUV LiDAR texnologiyasi o'rmon tuzilmasi haqida uch o'lchamli batafsil ma'lumot hamda keng qamrovni ta'minlaydi, ushbu tadqiqotda turli murakkablik darajasiga ega bo'lgan ikki xil o'rmon ekotizimida individual daraxtlarni segmentatsiya qilish algoritmlari yuqori zichlikdagi LiDAR ma'lumotlari asosida baholandi, ma'lumotlar DJI Matrice 300RTK platformasiga o'rnatilgan Zenmuse L1 sensoridan olingan, LiDAR ma'lumotlarini qayta ishlash metodologiyasi doirasida dastlabki bosqichlarda raqamli relyef modeli (DEM), raqamli sirt modeli (DSM) va daraxt balandligi modeli (CHM) yaratildi, LiDAR nuqta bulutida yer nuqtalarini tasniflash va aniq modellarni hosil qilishning samarali usullari tahlil qilindi hamda uchburchak notekis to'r (TIN) usuli eng maqbul variant sifatida topildi, individual daraxt darajasida o'rmonlarni tahlil qilish imkonini beruvchi segmentatsiya bosqichi amalga oshirildi, segmentatsiya o'rmon salomatligini kuzatish, biomassa miqdorini baholash va turlar tarkibi hamda xilma-xilligini tushunishda muhim hisoblanadi, biroq eng mos segmentatsiya usulini tanlash hozircha dolzarb ilmiy muammo bo'lib qolmoqda va eng optimal yondashuv hamda qo'llaniladigan metrikalar yuzasidan konsensus mavjud emas.

Kalit so'zlar: LiDAR, U-LS, DEM, CHM, daraxtlarni segmentatsiya qilish, LDR, MLS, Dalponte; Silva, Li.

Annotation: forests are important for biodiversity, climate regulation and hydrologic cycles, and sustainable management is necessary because of threats such as deforestation and climate change, while traditional forest monitoring methods are labor-intensive and limited, UUV LiDAR technology provides three-dimensional detailed information about the forest structure as well as extensive

ISSN 3030-3907

coverage, in this study, individual tree segmentation algorithms in two different forest ecosystems with different levels of complexity were evaluated on the basis of high density LiDAR data, data was obtained from the Zenmuse L1 sensor installed on the DJI Matrice 300rtk platform, within the LiDAR data processing methodology, digital relief model (DEM), digital surface model (DSM) and tree height model (CHM, In the LiDAR point cloud, effective methods for classifying ground points and generating accurate models were analyzed, and the triangular uneven net (TIN) method was found as the most optimal option, a segmentation stage was carried out that allows forest analysis at the individual tree level, segmentation is important in monitoring forest health, assessing biomass levels and understanding species composition and diversity, however, the choice of the most suitable segmentation method remains an urgent scientific problem for now, and there is no consensus on the most optimal approach as well as the metrics used.

Keywords: LiDAR, U-LS, DEM, CHM, tree segmentation, LDR, MLS, Dalponte; Silva, Li.

Аннотация: Леса важны для биоразнообразия, регулирования климата и гидрологических циклов, и устойчивое управление ими необходимо из-за таких угроз, как вырубка лесов и изменение климата, в то время как традиционные методы мониторинга лесов трудоемки и ограничены, технология UV LiDAR обеспечивает трехмерную подробную информацию о структуре леса, а также широкий охват, в этом исследовании алгоритмы сегментации отдельных деревьев в двух разных лесных экосистемах с разным уровнем сложности оценивались на основе данных LiDAR высокой плотности, данные были получены с датчика Zenmuse L1, установленного на платформе DJI Matrice 300rtk, с использованием цифровой модели рельефа (DEM), цифровой модели поверхности (DSM) и модели высоты дерева на ранних этапах в рамках методологии обработки данных LiDAR (CHM) создан, Были проанализированы эффективные методы классификации точек Земли и создания точных моделей в облаке точек лидара, а также метод треугольной неравномерной сетки (TIN) был признан наиболее подходящим вариантом, реализован этап сегментации, позволяющий анализировать леса на уровне отдельных деревьев, сегментация считается важной для мониторинга здоровья леса, оценки количества биомассы и понимания видового состава и разнообразия, однако выбор наиболее подходящего метода сегментации в настоящее время остается актуальной научной проблемой, и нет единого мнения о наиболее оптимальном подходе, а также о применимых метриках.

Ключевые слова: LiDAR, U-LS, dem, CHM, сегментация деревьев, LDR, MLS, dalponte; Сильва, ли.

ISSN 3030-3907

1. Kirish

O‘rmonli hududlar biologik xilma-xillikni saqlash va biogeokimyoviy tsikllarni tartibga solishda asosiy rol o‘ynaydi, bu sayyoramiz ekologik salomatligi uchun juda muhimdir. Bunday hududlar atmosferadagi karbonat angidridni yutib, uni o‘zida saqlab qolish orqali iqlim o‘zgarishlarini yumshatadigan karbon yutkichlar vazifasini bajaradi. Bundan tashqari, o‘rmonli hududlar ko‘plab, ayniqsa faqat shu muhitda yashay oladigan endemik turlar uchun muhim yashash joyi hisoblanadi.

O‘rmonlardagi biologik xilma-xillik ekotizim barqarorligi uchun muhim ahamiyatga ega, chunki turli organizmlar o‘rtasidagi o‘zaro ta’sirlar umumiy muvozanat va chidamlilikni ta’minlaydi. Bundan tashqari, o‘rmonlar gidrologik tsiklga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi, ya’ni yog‘ingarchilik tartibi va suv sifati shakllanishiga bevosita ta’sir qiladi, bu ichimlik suvi ta’minoti uchun muhimdir. Biroq, o‘rmonlarning kesilishi (deforestatsiya) va degradatsiyasi jiddiy tahdid tug‘diradi. Shu sababli, o‘rmonli hududlarni barqaror boshqarish uzoq muddatli ekologik barqarorlik va inson salomatligini ta’minlashda zarur hisoblanadi [1].

O‘rmonlarni kuzatishda an’anaviy usullar - masalan, dastlabki dala tadqiqotlari va inventarizatsiyalar - uzoq yillar davomida daraxt turlari, ularning zichligi va sog‘lig‘i haqidagi ma’lumotlarni yig‘ishda qo‘llanib kelgan. Ushbu usullar aniq va lokal ma’lumotlarni taqdim etgan bo‘lsada, ular ko‘p vaqt va mehnat talab qiladi, hamda hududiy qamrovi cheklangan.

Aksincha, zamonaviy texnologiyalar, xususan masofaviy zondlash platformalariga o‘rnatilgan sensorlar, o‘rmonlarni kuzatishda tub burilish yasadi [2,3]. Bu qurilmalar o‘rmon qoplami, biomassa va biologik xilma-xillikdagi o‘zgarishlarni yuqori aniqlik bilan va katta maydonlarda aniqlash imkonini beradi. Bu real vaqt rejimida monitoring yuritish va kesish yoki degradatsiyaga tezkor javob qaytarish imkoniyatini beradi.

2. Metodlar

An’anaviy va zamonaviy metodlarning kombinatsiyasi o‘rmon monitoringi aniqligi va samaradorligini yanada oshiradi. Bu o‘rmon sog‘lig‘ini baholash, muhofaza strategiyalarini rejalashtirish va barqaror o‘rmon boshqaruvini ta’minlash uchun kuchli asos yaratadi. So‘nggi o‘n yilliklar davomida masofaviy zondlash asosan sun’iy yo‘ldoshlar va samolyotlarda joylashtirilgan passiv sensorlardan foydalanib amalga oshirildi. Biroq, yaqinda uchuvchisiz uchish qurilmalari (UAV – Unmanned Aerial Vehicles) joriy etilishi orqali ancha yuqori fazoviy aniqlikka ega kuzatuvlarni amalga oshirish imkoniyati paydo bo‘ldi. Ushbu platformalar o‘rtasidagi asosiy farqlar xarajatlar, fazoviy va vaqtinchalik aniqlikda namoyon bo‘ladi. Sun’iy yo‘ldoshlar bepul ma’lumotlarni taqdim etsada, agar kunlik suratlar kerak bo‘lsa, fazoviy aniqlik 250 metr atrofida bo‘ladi. 10

ISSN 3030-3907

metrgacha bo‘lgan aniqliklar mumkin, lekin bunday holatda suratni yangilash 5 kun davom etadi. Tijorat sun’iy yo‘ldoshlari metrlik aniqlikda ma’lumot beradi, biroq ularning vaqtinchalik chastotasi past va qo‘shimcha xarajatlarni talab qiladi. Shu bilan birga, kichik/mikro/kub yo‘ldoshlar sohasidagi inqilob fazoviy va vaqtinchalik aniqligi yuqori bo‘lgan ma’lumotlarni nisbatan arzon narxda olish imkonini bermoqda (masalan, PlanetScope). Samolyotlar yuqori aniqlikdagi passiv yoki aktiv kuzatuvlarni taqdim eta oladi, ammo bular juda katta xarajat talab qiladi. Oxir-oqibatda, UAV texnologiyasi tez rivojlanmoqda va mahalliy hududlar monitoringi uchun xarajat va juda yuqori aniqlik o‘rtasida maqbul muvozanatni ta’minlaydi.

O‘rmon hududlarida passiv va aktiv masofadan zondlash sensorlaridan foydalanish keng qamrovli ma’lumotlarni yig‘ishning ajralmas qismiga aylangan bo‘lib, ular bir-birini to‘ldiruvchi yondashuvlarni taqdim etadi. LiDAR (Light Detection And Ranging) texnologiyasi o‘rmon monitoringida SAR Sun’iy aperturali radar (Synthetic Aperture Radar) hamda passiv multispektral (MS) yoki giperspektral (HS) ma’lumotlarga nisbatan bir qator afzalliklarga ega. Xususan, LiDAR o‘rmon tuzilmasi haqida yuqori aniqlikdagi uch o‘lchamli ma’lumotlarni taqdim etib, daraxt tojining balandligi, zichligi hamda pastki qatlam tarkibi haqidagi aniq ma’lumotlarni qayd etadi. Ushbu darajadagi batafsillik biomassa hajmini aniqlash, uglerod zaxirasini baholash va o‘rmon inventarizatsiyasini chuqur o‘tkazish uchun muhim hisoblanadi. Aksincha, SAR texnologiyasi barcha ob-havo sharoitlarida foydali bo‘lishi va ishlatilayotgan chastota diapazoniga qarab ayrim o‘simlik qatlamlarini yorib o‘tish imkoniyatiga ega bo‘lishiga qaramay, odatda pastroq fazoviy aniqlikni taqdim etadi va uning tahlili murakkabdir. MS yoki HS ma’lumotlari esa quyosh nuri va ochiq ob-havoga bog‘liq bo‘lgani sababli ularning mavjudligi va izchilligi cheklangan bo‘lishi mumkin. Shuningdek, optik sensorlar asosan sirt refleksiyasini qayd etadi va zich daraxt tojlarini yorib o‘tish hamda o‘rmonning vertikal tuzilishi haqida batafsil ma’lumot berish imkoniyatiga ega emas. Shu bilan birga, LiDARning tuzilmaviy ma’lumotlari, SARning sirt notekisligi va tekstura ko‘rsatkichlari hamda multispektral va gipersektral sensorlardan olingan spektral ma’lumotlarni birlashtirish orqali o‘simlik salomatligi, turlarning tarkibi va o‘rmon dinamikasi haqida yanada chuqurroq tushuncha hosil qilish mumkin. Ma’lumotlarning bunday integratsiyasi ekotizimni yanada aniq baholash imkonini beradi hamda barqaror yer resurslarini boshqarish va tabiatni muhofaza qilish bo‘yicha qarorlar qabul qilishni takomillashtirishga xizmat qiladi.

Ta’kidlanganidek, LiDAR tizimlari o‘rmonlarni tahlil qilishda kuchli vositadir. Ayniqsa, hozirda turli ehtiyojlarga qarab bir nechta LiDAR turlari mavjud [4]: UAV asosidagi LiDAR tizimlari (ULS), samolyotga o‘rnatiladigan

ISSN 3030-3907

LiDAR tizimlari (ALS), mobil LiDAR tizimlari (MLS) va yerda joylashgan LiDAR tizimlari (TLS). ULS tizimlari uchuvchisiz uchish qurilmalariga o‘rnatiladi va yuqori fazoviy aniqlik, zichlik va moslashuvchanlikni ta’minlaydi. ULS ayniqsa kichik va o‘rta hududlar uchun juda foydali bo‘lib, daraxtlar tuzilmasi, balandligi va biomassasini tahlil qilishda mukammal ma’lumot beradi. ULS past balandlikda parvoz qilganligi sababli juda mayda tafsilotlarni ham aniqlay oladi. Aslida, ULS MLS va TLS ga nisbatan bir qator ustunliklarga ega - u hatto uzoq va tog‘li, qiyin kiriladigan hududlarni ham bemalol monitoring qilishga imkon beradi [4]. Bunga qarama-qarshi holda, MLS faqat transport vositalari kira oladigan yo‘nalishlar bilan cheklanadi, TLS ultra-yuqori aniqlikdagi ma’lumot bersada, juda mehnat talab qiladi va katta maydonlarni o‘rganishga samarasiz. Shu bilan birga, ULS tizimlari keng miqyosli monitoring uchun MLS va TLS tizimlariga nisbatan arzonroq variant hisoblanadi.

Shuningdek, LiDAR tizimlari sun’iy yo‘ldoshlar asosida ham mavjud, masalan, Xalqaro fazo stansiyasiga o‘rnatilgan GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) yoki ICESat-2 yo‘ldoshidagi ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) [5, 6]. Biroq, bu platformalarning fazoviy aniqligi mahalliy darajadagi o‘simliklarni aniq o‘rganish uchun yetarli emas.

LiDAR ma’lumotlarini tahlil qilishda samarali algoritmik jarayonlar zarur bo‘lib, bu dastlabki ma’lumotlarni foydali ekologik axborot mahsulotlariga aylantiradi. Odatda, LiDAR tahlil qilish jarayoni bir necha bosqichlardan iborat bo‘lib, ulardan biri Canopy Height Model (CHM)ni hosil qilishdir. CHM o‘simliklarning yer sathidan balandligini aniqlaydi va bu o‘rmon sog‘lig‘i va uning dinamikasini vaqt o‘tishi bilan kuzatish uchun juda muhimdir.

Zamonaviy o‘rmon xo‘jaligini boshqarishda individual daraxtlarni segmentatsiya qilish muhim rol o‘ynaydi. Aniq daraxt segmentatsiyasi orqali o‘rmon ichidagi har bir daraxtni aniqlash mumkin bo‘lib, bu daraxtlarning o‘sishi, salomatligi va turlar tarkibini monitoring qilishda muhim hisoblanadi. Bu kabi ma’lumotlar barqaror o‘rmon xo‘jaligini yuritishda zarur bo‘lib, daraxt hajmi va biomassa bo‘yicha batafsil ma’lumot berish orqali karbon zaxiralarini baholashni ham qo‘llab-quvvatlaydi. Bu o‘z navbatida karbon yutish salohiyatini baholash uchun asos bo‘ladi.

Bundan tashqari, daraxt segmentatsiyasi o‘rmon tiklanishini kuzatish, kasalliklar yoki zararkunandalar bilan erta zararlanish belgilarini aniqlash va muhofaza choralari samarasini baholash imkonini beradi. UAV LiDAR tizimlari (ULS) ma’lumotlari bilan ishlaganda, segmentatsiya - individual daraxtlarni aniqlash va o‘lchash uchun asosiy ishlov berish bosqichi bo‘lib, u murakkab o‘rmon tuzilmalarida aniqlikni ta’minlaydi. Segmentatsiya algoritmlari CHM (canopy height model) yoki normallashtirilgan LiDAR nuqta bulutlari asosida

ISSN 3030-3907

individual daraxtlarni aniqlaydi. LiDAR ma’lumotlarida daraxt segmentatsiyasi uchun bir nechta yondashuvlar mavjud - oddiy balandlik asosidagi filtratsiyadan tortib murakkab mashinaviy o‘rganish (machine learning) algoritmlarigacha. An’anaviy usullar asosan vodiy chegaralarini aniqlash (valley delineation), suv havzasi segmentatsiyasi (watershed segmentation) va shablon asosidagi moslashtirish (template matching) kabi usullardan foydalanadi. Biroq bu usullar ko‘pincha qo‘lda parametr sozlashni talab qiladi va tasvir sifati o‘zgarishlariga sezgir bo‘ladi. So‘nggi yillarda mashina va chuqur o‘rganish (deep learning) modellari individual daraxt segmentatsiyasi uchun kuchli muqobil vosita sifatida paydo bo‘ldi. 2023-yilgacha bo‘lgan 10 yillik davrda chop etilgan 144 ta maqolani o‘z ichiga olgan so‘nggi tahlilda ko‘pchilik ishlar daraxt segmentatsiyasi va klassifikatsiyasi uchun RGB yoki multispektral kameralardan foydalangani aniqlangan. LiDAR skanerlari asosidagi segmentatsiyalarda asosan nazoratsiz mashinaviy o‘rganish texnikalari ishlatiladi, jumladan: lokal maksimal (local maxima), watershed, Voronoy tessellatsiyasi (Voroni tessellation), mintaqa bo‘yicha o‘sish (region growing), va nuqta buluti segmentatsiyasi (point cloud segmentation). Boshqa bir tahlilda esa konvolyutsion neyron tarmoqlari (CNN) asosida individual daraxt tojlarini aniqlash va ajratishga e’tibor qaratilgan. Bu tadqiqotga ko‘ra, eng ko‘p ishlatiladigan ma’lumot turi bu - UAV yordamida olingan yuqori aniqlikdagi RGB tasvirlar bo‘lib, R-CNN, Mask R-CNN, YOLO va PointNet++ kabi modellar ommalashgan. Garchi segmentatsiya uchun ko‘plab algoritmlar ishlab chiqilgan bo‘lsada, har xil o‘rmon turlari va ma’lumotlar turlariga nisbatan optimal yondashuvlar bo‘yicha umumiy kelishuv hali mavjud emas. Tadqiqotlar faqat havodan olingan tizimlar (ALS va ULS) asosida cheklangan, yerda yuritiladigan LiDAR ishlari ko‘rib chiqilmagan. Tadqiqotlar turli o‘rmon turlarini qamrab oladi (masalan, mo‘tadil va alp hududlardagi o‘rmonlar), ularning aksariyati ignabargli yoki evkalipt o‘rmonlaridir. Daraxt darajasidagi tahlillar uchun asosan yuqori zichlikdagi UAV LiDAR ma’lumotlari ishlatiladi, samolyot yoki vertolyotlar kamroq qo‘llaniladi. Nuqta bulutining zichligi bir kvadrat metrga bir nechta nuqtadan minglab nuqtagacha farqlanadi. Oldindan ishlov bosqichida yer nuqtalarini belgilash, raqamli relyef modeli (DEM), CHM yoki normallashtirilgan nuqta bulutini yaratish uchun eng ko‘p ishlatiladigan dasturlar: LIDAR360 va LidR, shuningdek CloudCompare va LAStools.

Daraxt segmentatsiyasi uchun eng ko‘p ishlatiladigan algoritmlar:

- CHM asosida - Local Maxima Filtering va Watershed,
- boshqa mashhur usullar: Silva2016, Dalponte2016.

Nuqta buluti asosidagi segmentatsiya algoritmlaridan Li2012 eng ko‘p uchraydi, undan keyin Layer Stacking, MeanShift va boshqalar. Hali ko‘p ishlarda

ISSN 3030-3907

chuqur o‘rganish yondashuvlari kam qo‘llanilmoqda. Shuningdek, daraxt tojlarini aniqlash va ajratishga bag‘ishlangan CNN asosidagi tahlilga ko‘ra, bu modellar aniq natijalar bergan, biroq ularning samaradorligi o‘rmon muhitlari va ma’lumot turlariga qarab o‘zgarib turgan. Ayniqsa, ResNet neyron tarmog‘i eng ko‘p ishlatilgan arxitektura bo‘lgan. Biroq, CNN modellari asosan yuqori aniqlikdagi RGB tasvirlarga asoslangan, chunki ochiq LiDAR segmentatsiya qilingan ma’lumotlar bazalari yetarli emas, bu chuqur o‘rganish modellarini o‘qitish va sinovdan o‘tkazishni qiyinlashtiradi. Ushbu muammolarni hisobga olgan holda, ushbu tadqiqot ULS (UAV LiDAR System) ma’lumotlari yordamida individual daraxtlarni aniqlash va toj chegaralarini belgilash bo‘yicha algoritmlarning taqqoslov tahlilini olib boradi. Algoritmlar tomonidan qo‘llanilgan ikki turdagi kirish ma’lumotlari (CHM raster tasviri va normallashtirilgan 3D nuqta buluti) ko‘rib chiqilib, eng samarali yondashuvlar aniqlanishi maqsad qilingan. Shu kontekstda, ushbu ishning asosiy hissasi quyidagicha umumlashtiriladi:

- ULS ma’lumotlaridan foydalangan holda yer sathidagi nuqtalarni klassifikatsiya qilish va mos raqamli relyef modelini (DEM) yaratish uchun eng samarali oldindan ishlov berish usullarini baholash;
- O‘rmon hududlarida LiDAR ma’lumotlari asosida individual daraxtlarni segmentatsiyalash bo‘yicha so‘nggi tadqiqotlarning batafsil va dolzarb sharhini amalga oshirish;
- Igna bargli o‘rmon maydonida individual daraxtlarni segmentatsiyalash algoritmlarini baholash va taqqoslashni osonlashtirish uchun ochiq kirishli, ULS bilan belgilangan ma’lumotlar to‘plamini ishlab chiqish;
- Turli darajadagi o‘rmon murakkabligi bilan tavsiflangan ssenariylarda yetakchi segmentatsiya algoritmlarining taqqoslov tahlilini o‘tkazish.

Ushbu tadqiqotda Zenmuse L1 sensori tomonidan olingan LiDAR nuqta bulutlari ma’lumotlaridan foydalanildi. Bu yuqori unumli sensor soniyasiga 240 000 nuqtani qayd etish imkonini beradi va bu keng va batafsil qamrovni ta’minlaydi. Vertikal aniqligi 5 sm va gorizontal aniqligi 10 sm bo‘lib, yig‘ilgan ma’lumotlar yuqori aniqlikka ega. Sensor DJI Matrice 300RTK uchuvchisiz uchish qurilmasiga o‘rnatilgan. LiDAR ma’lumotlariga qo‘llanilgan segmentatsiya algoritmlarining aniqligini baholash uchun yer usti (ground truth) ma’lumotlari zarur edi. Taburiyente parkida ilgari mavjud dala ma’lumotlari bo‘lmagani sababli 47 m × 58 m maydonli namunaviy uchastka tanlandi. Bu yerda alohida ajralgan va tojlari ustma-ust tushgan daraxtlar mavjud bo‘lgan gibrid ssenariylar tahlil qilindi. Umumiy hisobda 24 ta daraxt (xususan, qarag‘aylar) sanab chiqildi. Bundan tashqari, balandligi 3 metrdan oshadigan zich pastki o‘simliklar mavjud edi. Ularning aniq koordinatalari belgilandi, har xil burchaklardan fotosuratlar va videotasvirlar olingan, shuningdek, normallashtirilgan nuqta bulutida qo‘lda

ISSN 3030-3907

segmentatsiya amalga oshirilib, boshqa algoritmlar bilan taqqoslash uchun referens ma'lumotlar to'plami yaratildi. Bu to'plam quyidagi manzilda ochiq mavjud:

O'rmonlarni muhofaza qilishni qo'llab-quvvatlaydigan foydali axborot mahsulotlarini yaratish uchun dastlabki LiDAR nuqta bulutlarini to'liq qayta ishlash protokoli zarur. LiDAR ma'lumotlarini qayta ishlashning umumiy jarayoni odatda quyidagi bosqichlarni o'z ichiga oladi:

1. Ma'lumotlarni yig'ish – dastlabki LiDAR ma'lumotlarini to'plash;
2. Filtrlash – shovqin va ahamiyatsiz nuqtalarni olib tashlash;
3. Tasniflash – har bir nuqtani yer, o'simlik va boshqa toifalarga ajratish;

Model yaratish – tasniflangan nuqtalardan interpolatsiya yordamida uzluksiz modellarni yaratish: Raqamli relyef modeli (DEM), Raqamli sirt modeli (DSM) va Butazor balandligi modeli (CHM) DSMdan DEMni ayirish orqali olinadi. Individual daraxt parametrlarini ajratib olishda qo'llaniladigan metodologiyaning umumiy sxemasi 1-rasmda ko'rsatilgan. Ko'k bloklar 3D nuqta bulutlari bilan bog'liq jarayonlar yoki ma'lumotlarni, yashil bloklar esa raster tasvirlarga oid jarayonlarni ifodalaydi. Diagrammadan ko'rinib turibdiki, segmentatsiya algoritmlari kontekstga qarab 3D yoki 2D ma'lumotlarga tatbiq etiladi.

2. Oldindan qayta ishlash (Preprocessing)

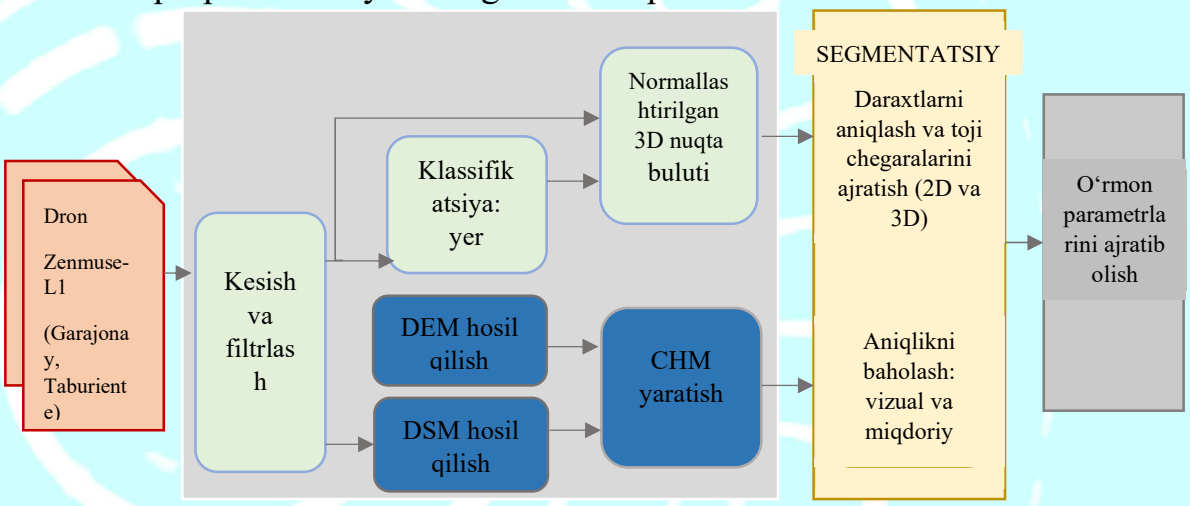
Dastlabki filtrlash va shovqin hamda g'ayritabiiy qiymatlarni olib tashlashdan so'ng, LiDAR nuqta bulutlarini oldindan qayta ishlashdagi eng muhim bosqichlardan biri bu yer sathining tasnifi hisoblanadi. Tuproq va no-tuproq sinflarini farqlash raqamli relyef modelini (DEM) to'g'ri yaratish imkonini beradi.

Ma'lumot yetkazib beruvchi tasniflangan nuqta bulutlarini taqdim etmagan hollarda, yer sathini aniqlash uchun bir nechta algoritmlar ishlab chiqilgan. Har bir algoritm aniq natijalar va hisoblash samaradorligi nuqtai nazaridan o'ziga xos afzalliklarga ega. Ushbu maqolada quyidagi uchta mashhur algoritmning qo'llanilishi o'rganiladi va baholanadi:

1. Progressiv Morfologik Filtr (PMF) algoritmi [10] – LiDAR ma'lumotlaridagi yer nuqtalarini morfologik operatsiyalarni iterativ qo'llash orqali no-yer nuqtalarni olib tashlab tasniflaydi. Har bir bosqichda filtr oynasi hajmi oshirib boriladi, bu orqali balandroq obyektlar chiqarib tashlanadi va yer hamda no-yer nuqtalari samarali ajratiladi.
2. Matoli Simulyatsiya Funksiyasi (CSF) algoritmi [11] – LiDAR nuqtalarining teskari tasviriga mato yopilgan holatni simulyatsiya qiladi. Mato va nuqtalar o'rtasidagi o'zaro ta'sirni tahlil qilish orqali, matoning yakuniy shakliga asoslanib yer nuqtalari aniqlanadi, chunki u relyefga moslashadi.
3. Uchburchakli Notekis Tarmoq (TIN) algoritmi [12] – dastlabki yer nuqtalaridan uchburchaklar orqali tarmoq tuzadi va keyinchalik aniq mezonlarga mos keluvchi

ISSN 3030-3907

yangi nuqtalarni qo‘shib, modelni bosqichma-bosqich boyitadi. Bu yer sathining yanada aniqroq modelini yaratishga xizmat qiladi.



1-rasm. LiDAR ma’lumotlari asosida o‘rmon parametrlarini ajratib olish uchun yakka daraxtlarni aniqlash va tojlari chegarasini belgilashning soddalashtirilgan metodologiyasi.

Yer nuqtalarini klassifikatsiya qilishdan keyingi asosiy bosqich bu - raqamli relyef modeli (DEM) ni yaratishdir. Bu model - tahlil qilinayotgan hudud relyefini tasvirlaydigan raster tasvirdir. DEM ni yaratish uchun avval yer sathiga tegishli deb belgilangan nuqtalar olinadi va keyin ularning asosida bo‘sh joylardagi yer nuqtalarini aniqlash uchun fazoviy interpolatsiya algoritmlari qo‘llaniladi. Ushbu tadqiqot doirasida quyidagi uchta asosiy algoritm baholandi:

1. Triangulyatsiyalangan to‘r algoritmi (TIN – Triangulated Irregular Network): Bu algoritm yer nuqtalarini uchburchakli segmentlar bilan bog‘lab, relyef yuzasini modellashtiradi.
2. Kriging interpolatsiyasi: Bu geostatistik yondashuv bo‘lib, nuqtalar orasidagi fazoviy bog‘liqlikni hisobga olgan holda, relyef qiymatlarini bashorat qiladi.
3. IDW (Inverse Distance Weighting – Masofaga teskari og‘irliklar bilan baholash): Bu usulda noma’lum nuqta qiymati yaqin atrofdagi nuqtalar og‘irligi asosida aniqlanadi, masofa kamaygani sari og‘irlik ortadi.

Ushbu algoritmlar o‘rmon relyefini aniq modellashtirishda qo‘llaniladi va ularning natijalari individual daraxtlarni aniqlash, tojlari chegarasini belgilash va o‘rmon monitoringi uchun muhim ahamiyatga ega.

Raqamli sirt modeli (DSM) Yer sathining relyefini, jumladan, daraxtlar, binolar va boshqa inshootlar kabi barcha tabiiy hamda sun’iy obyektlarni o‘z ichiga olgan holda tasvirlaydi. Shunday qilib, DSM yer yuzasidagi barcha obyektlarning balandliklarini qayd etadi. Uni yaratishda, avvalgi paragrafda DEM hosil qilish uchun keltirilgan algoritmlarning o‘zi qo‘llanadi, biroq bunda nuqta bulutida mavjud bo‘lgan barcha ma’lumotlar inobatga olinadi. Toj balandligi modeli (Canopy Height Model, CHM - daraxtlar kabi o‘simliklarning yer sathidan

ISSN 3030-3907

yuqoridagi balandligini ko‘rsatadi. U DSM dan DEM ni ayirish orqali yaratiladi: DSM barcha obyektlarning balandligini, DEM esa ochiq yer sathini bildiradi. Bu 2D model o‘rmon tojlari tuzilishini aniq ko‘rsatib beradi va ekologik va o‘rmon xo‘jaligi tadqiqotlari uchun muhim.

3. Natijalar

Normallashtirilgan 3D nuqta buluti;

3D nuqta buluti normallashtiriladi — bu nuqtalarning balandlik qiymatlari yer sathi nisbatan qayta hisoblanishini anglatadi. Bu yer relyefi ta’sirini yo‘qotib, obyektlarning (masalan, daraxtlar, binolar) aniq balandligini o‘lchash imkonini beradi.

Daraxtlarni segmentatsiya qilish texnikalari ikki asosiy toifaga bo‘linadi:

- Yakka daraxtlarni aniqlash (individual tree detection) - daraxtlarning joylashuvini yoki cho‘qqilarini nuqta obyektlar sifatida aniqlaydi.
- Tojlarni chegaralash (individual crown delineation) - har bir daraxt toji chegarasini ko‘pburchak shaklida belgilaydi.

An’anaviy metodlar:

- Yakka daraxt aniqlash: mahalliy maksimum filtrlash, rasm binarizatsiyasi, shablon moslashtirish, masshtab tahlili.
- Toj chegarasini ajratish: vodiyga ergashish, hudud o‘sishi (region-growing), watershed segmentatsiyasi.

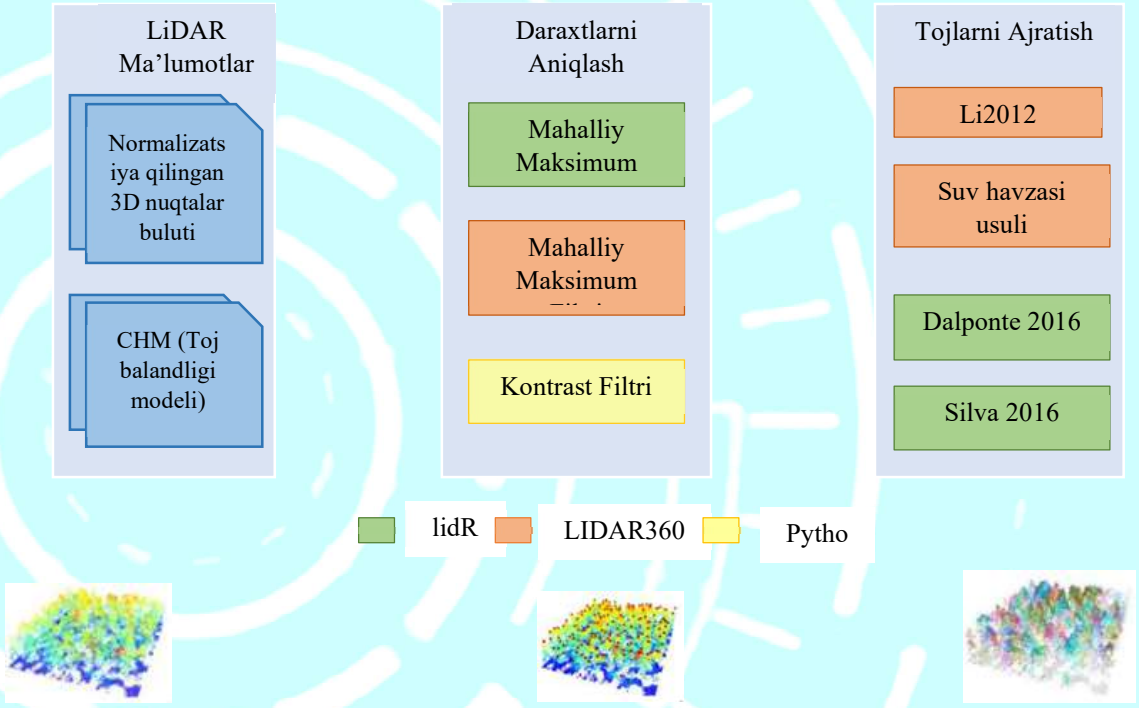
Ba’zi toj ajratish metodlari avval yakka daraxtlarni aniqlashni talab qiladi.

Shuningdek, LiDAR ma’lumotlari asosida yakuniy segmentatsiya usullarini tanlashda hali ham yagona yondashuv mavjud emas. Shuning uchun biz LIDAR360 (8.0-versiya) va LidR (4.1.0-versiya) dasturlaridan foydalanishga qaror qildik.

- LIDAR360 - tijoriy, ishonchli dasturiy ta’minot bo‘lib, katta hajmdagi nuqta bulutlarini qayta ishlay oladi. Yakka daraxtlarni aniqlash, toj balandligi modelini yaratish va toj chegaralarini belgilash algoritmlariga ega. Yirik o‘rmonlar uchun qulay va foydalanuvchiga mos.
- LidR - bu ochiq kodli R paketi bo‘lib, moslashuvchanlik darajasi yuqori, ko‘plab segmentatsiya metodlarini o‘z ichiga oladi va ilmiy tadqiqotlarda keng qo‘llaniladi.

Segmentatsiya metodologiyasi 2-rasmda blok-sxema ko‘rinishida keltirilgan. Har bir bosqichda qaysi dasturiy ta’minot ishlatilgani alohida rang bilan ajratilgan. Yakka daraxtlarni aniqlash algoritmlari segmentatsiyadan oldin qo‘llanilishi kerak

ISSN 3030-3907



2-rasm. Yakka daraxtlarni aniqlash va ularning shohlari chegarasini belgilash usullarining samaradorligini solishtirish uchun tanlangan algoritmlar.

Daraxtlarni aniqlashda eng ko‘p qo‘llaniladigan algoritm bu Mahalliy Maksimum Filtri (Local Maximum Filter - LMF) [8] hisoblanadi. Bu usul balandlik bo‘yicha mahalliy maksimal qiymatlarga ega nuqtalarni qidirishga asoslangan. Qidiruv oynasi o‘lchamini aniqlash kerak bo‘ladi, bu aylana yoki kvadrat shaklida bo‘lishi mumkin. Ahamiyatsiz hududlar, masalan, butazorlar kabi joylarda noto‘g‘ri maksimal nuqtalarni tanlamaslik uchun, filtrga minimal balandlik chegarasini qo‘llash mumkin. Bundan tashqari, biz Kontrast Filtri (Contrast Filter - CF) [9] algoritmini ham sinovdan o‘tkazdik, chunki u boshqa kompyuter ko‘rish sohalaridagi o‘xshash 3D ma’lumotlar bilan samarali ishlatilgan. Bu algoritm an’anaviy matematik morfologiya usullariga asoslangan bo‘lib, ayniqsa maksimal nuqtalarni aniqlash uchun kengaytiruvchi rekonstruksiya (dilation reconstruction) amaliyotidan foydalanadi. Algoritm avval rasmning kontrastini kamaytirish uchun har bir piksel qiymatidan C doimiy qiymatini ayiradi, bu esa mahalliy maksimalar ajralib chiqishiga olib keladi. C qiymati kontrast chegarasi sifatida xizmat qiladi: piksellar o‘z atrofiga nisbatan qancha farq qilsa, maksimal deb hisoblanadi. C qancha kichik bo‘lsa, shuncha ko‘p maksimal nuqtalar aniqlanadi.

4. Muhokama

Daraxtlarni segmentatsiya qilish va ularning shoxlarini chegaralash uchun CHM (Toj balandligi modeli) asosidagi algoritmlar va normallashtirilgan 3D nuqta buluti asosida ishlovchi algoritmlar ko‘rib chiqildi. Birinchi guruhga quyidagilar kiradi: Dalponte2016 [4], Silva2016 [5] va Watershed [6]; ikkinchi guruhda esa Li2012 [7] algoritmi tanlandi. Ularning qisqacha tavsifi:

ISSN 3030-3907

(i) Dalponte2016 - urug‘ (seed) va mintaqani kengaytirish (region-growing) asosida ishlaydigan CHM algoritmi. Dastlab, mahalliy maksimalar daraxt shoxlari o‘sib chiqadigan boshlang‘ich nuqtalar sifatida belgilanadi. So‘ngra, to‘rtta qo‘shni pikselning balandlik qiymatlari olinadi. Foydalanuvchi quyidagi ikki parametrni aniqlashi kerak: maksimal balandlikka nisbatan foiz va maksimal farq. Qo‘shni piksel faqat vertikal masofa bu foizdan va maksimal farqdan kichik bo‘lsa, mintaqaga qo‘shiladi. Bu baholash barcha piksellarda takroran amalga oshiriladi.

(ii) Silva2016 - CHM asosida ishlaydigan, murakkab o‘rmon tuzilmalarini samarali segmentatsiya qilishga qaratilgan algoritm. Bu usul urug‘ va Voronoy diagrammalariga asoslanadi. Har bir urug‘dan boshlab, foydalanuvchi belgilagan radiusda bufer hudud ajratiladi va daraxt shoxining boshlang‘ich maydoni belgilanadi. Keyin, Voronoy diagrammalari yordamida daraxtlar ta’sir doirasi sifatida poligonlar yaratiladi. Har bir poligon uchun, eng baland daraxt nuqtasiga nisbatan belgilangan foizdan kichik bo‘lgan balandlikdagi nuqtalar chiqarib tashlanadi - bu past balandlikdagi shovqinni yo‘qotish uchun. So‘ngra, filtrlangan poligonlar asosida daraxtlar alohida belgilanadi. Daraxt segmentatsiyasi modellarining aniqligini baholash metodologiyaning muhim bosqichidir va xaritalangan daraxt joylashuvlari hamda shox-chegaralarni sifatli (vizual) va miqdoriy (raqamli) jihatdan baholashni o‘z ichiga oladi.

Sifatli baholash uchun, odatda vizual tekshiruvlar o‘tkaziladi - bunda segmentatsiya natijalari haqiqiy rangli aerofotosuratlar yoki toj balandlik modeli (CHM) kabi subyektiv manba ma’lumotlari bilan taqqoslanadi. Bu usul segmentatsiya algoritmlarining umumiy samaradorligi va xatoliklarning fazoviy taqsimotini to‘g‘ridan-to‘g‘ri tahlil qilish imkonini beradi. Boshqa tomondan, miqdoriy baholashda odatda kompyuter ko‘rish (computer vision) sohasida keng qo‘llaniladigan mezonlar yordamida daraxtlarni aniqlash yoki shoxlarni chegaralash samaradorligi har xil jihatlardan baholanadi.

Ushbu ishda tanlangan an’anaviy ko‘rsatkichlardan biri:

(ii) Aniqlik *(p)* - barcha aniqlangan daraxtlar ichida to‘g‘ri aniqlanganlarini o‘lchash ko‘rsatkichidir. U haqiqiy ijobiylar (*TP:* to‘g‘ri aniqlangan yoki segmentlangan daraxtlar soni)ning haqiqiy ijobiylar va yolg‘on ijobiylar (*FP:* noto‘g‘ri aniqlangan yoki segmentlangan hududlar, ya’ni daraxt sifatida noto‘g‘ri qayd etilgan boshqa obyektlar soni) yig‘indisiga nisbati orqali hisoblanadi.

$$p = \frac{TP}{TP + FP}$$

(ii) Qayta chaqirish *(r)* - algoritm tomonidan haqiqiy daraxtlarning qanchasi to‘g‘ri aniqlanganini baholaydi. Bu ko‘rsatkich algoritmning LiDAR ma’lumotlarida mavjud bo‘lgan daraxtlarning aksariyatini aniqlash qobiliyatini ifodalaydi. U haqiqiy ijobiylar *(TP)*ning, haqiqiy ijobiylar va yolg‘on salbiylar

ISSN 3030-3907

(FN: segmentlanmagan, ya'ni aniqlanmay qolgan daraxtlar soni) yig'indisiga nisbati orqali hisoblanadi.

$$r = \frac{TP}{TP + FN}$$

(iii) $F1$-ko'rsatkich - bu aniqlik (precision) va qayta chaqirish (recall)ning garmonik o'rtachasi bo'lib, ikkala ko'rsatkichni muvozanatlashtiruvchi yagona metrikaning qiymatini beradi. U ayniqsa, sinflar notekis taqsimlangan ma'lumotlar to'plamida yoki yolg'on ijobiylar hamda yolg'on salbiylarning ikkalasi ham birdek muhim bo'lgan hollarda foydali hisoblanadi.

$$F1 = 2 \times \frac{p \times r}{p + r}$$

(iv) Kesishish va birlashish koeffitsiyenti (Intersection over Union - IoU) - bu bashorat qilingan daraxt shoxi konturi (tree crown) bilan haqiqiy (ground truth) kontur o'rtasidagi mos kelish darajasini o'lchaydi. U kesishish maydonining birlashma maydoniga nisbatida hisoblanadi. IoU odatda foizlarda ifodalanadi: 0 - hech qanday mos kelmaslikni, 100 esa mukammal mos kelishni bildiradi. Algoritm ishlash samaradorligini batafsil baholash uchun bir nechta IoU chegaralari qo'llanishi mumkin.

$$IoU = \frac{\Pr edicted \cap GroundTruth}{\Pr edicted \cup GroundTrut}$$

Ushbu metrikalar birgalikda qo'llanilganda, daraxtlarni segmentatsiya qilish algoritmlarini har tomonlama baholash imkonini beradi hamda turli algoritmlarning kuchli va zaif tomonlarini tushunishga, ularni takomillashtirishga va o'rmonlarni aniq inventarizatsiya qilish hamda boshqarishni ta'minlashga yordam beradi. Turli segmentatsiya ishlanmalarida, qo'llanish sohasiga qarab, kamroq uchraydigan boshqa metrikalar ham ishlatiladi. Ulardan biri - o'rtacha kvadrat xatolik ildizi (Root Mean Square Error – RMSE) bo'lib, bashorat qilingan va haqiqiy daraxtlar soni yoki shox-toj maydonlari o'rtasidagi farqlarni miqdoran baholaydi. Yana biri - aniqlanish koeffitsiyenti (R^2), u haqiqiy ma'lumotlardagi dispersiyaning bashorat qilingan ma'lumotlar orqali tushuntirilgan qismini o'lchaydi. Bu algoritm bashoratlarining mos kelish darajasini ifodalovchi statistik ko'rsatkichdir.

Oxir-oqibat, umumiy aniqlik (Overall Accuracy – OA) esa ma'lumotlar to'plamidagi jami daraxt shox-tojlaridan nechta to'g'ri aniqlanganini ulush sifatida hisoblaydi.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

ISSN 3030-3907

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)(\hat{y}_i - \overline{\hat{y}}_i)^2\right]}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y}_i)^2 \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \overline{\hat{y}}_i)^2}$$

$$OA = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

n – daraxtlar soni; y_i va $\hat{y}_i$ – mos ravishda i-daraxt uchun kuzatilgan va prognoz qilingan qiymatlar; y_i va $\hat{y}_i$ – kuzatilgan va prognoz qilingan o‘rtacha qiymatlar.

5. Xulosa

O‘rmonlar ijtimoiy, iqtisodiy va ekologik jihatdan katta foyda beradi, shuning uchun ularni aniq kuzatish bo‘yicha yechimlar zarur. Shu nuqtai nazardan, LiDAR texnologiyasi o‘rmon tuzilmasini, jumladan, daraxt tojining balandligi, zichligi va biomassasini yuqori aniqlikda uch o‘lchamli xaritalash imkonini beruvchi ma’lumotlarni taqdim etadi. Ushbu batafsil ma’lumotlar o‘rmon salomatligi, biologik xilma-xillik va uglerod zaxiralarini yanada aniq baholashga yordam beradi. LiDAR ma’lumotlaridan foydalanish orqali o‘rmonlarni boshqaruvchilar maqsadli konservatsiya strategiyalarini ishlab chiqishlari va vaqt o‘tishi bilan yuz berayotgan o‘zgarishlarni yuqori aniqlikda kuzatishlari mumkin.

ADABIYOTLAR

1. Eugenio, F.C.; Da Silva, S.D.P.; Fantinel, R.A.; De Souza, P.D.; Felippe, B.M.; Romua, C.L.; Elsenbach, E. O‘rmon turlarida zararkunandalar va kasalliklarni aniqlash uchun masofadan boshqariladigan uchuvchi apparatlar tizimlari: global holat va kelajakdagi chaqiriqlar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2022, 10, 320–333. [CrossRef]

2. Duan, P.; Wang, Y.; Yin, P. Qo‘riqlanadigan hududlarni monitoring qilishda masofaviy zondlash qo‘llanmalari: bibliometrik tahlil. *Remote Sensing*, 2020, 12, 772. [CrossRef]

3. Kattenborn, T.; Leitloff, J.; Schiefer, F.; Hinz, S. Vegetatsiyani masofadan zondlashda konvolyutsion neyron tarmoqlar (CNN) bo‘yicha sharh. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 173, 24–49. [CrossRef]

4. Dalponte, M.; Coomes, D.A. Havo orqali olingan lazerli skanerlash va giperspektral ma’lumotlar asosida o‘rmon uglerod zichligini daraxt markazli xaritalash. Ekologiya va evolyutsiya usullari (Methods Ecol. Evol.), 2016, 7-jild, 1236–1245. [CrossRef]

5. Silva, C.A.; Hudak, A.T.; Vierling, L.A.; Loudermilk, E.L.; O’Brien, J.J.; Jack, S.B.; Gonzalez-Beneque, C.; Hiers, J.K.; Lee, H.; Falkowski, M.J.; va boshq. Daladagi kuzatuv va LiDAR ma’lumotlari asosida uzunigna qarag‘ayi (Pinus palustris Mill.) daraxtlarining individual atributlarini imputatsiya qilish. Kanada

ISSN 3030-3907

Masofaviy Zondlash Jurnali (Can. J. Remote Sens.), 2016, 42-jild, 554–573. [CrossRef]
6. Chen, Q.; Baldocchi, D.; Gong, P.; Kelly, M. Isolating Individual Trees in a Savanna Woodland Using Small Footprint Lidar Data. Photogramm. Eng. Remote Sens. 2006, 72, 923–932. [CrossRef]
7. Li, W.; Guo, Q.; Jakubowski, M.K.; Kelly, M. LiDAR nuqta bulutidan individual daraxtlarni segmentatsiya qilish uchun yangi usul. Fotogrammetriya, muhandislik va masofaviy zondlash (Photogramm. Eng. Remote Sens.), 2012, 78-jild, 75–84. [CrossRef]
8. Boboqulov A.D. Geoaxborot tizimlari asosida hududiy o‘rmon xo‘jaligi monitoringini yuritish / “Al-Farg‘oniy avlodlari” elektron ilmiy jurnali ISSN 2181-4252. Tom: 1 | Son: 2 | 2025-yil.
9. Boboqulov A.D. Hududiy o‘rmon xo‘jaligi kompleksi resurslarini boshqaruv tizimini rivojlantirish omillari. Raqamli Transformatsiya va Sun’iy Intellekt ilmiy jurnali VOLUME 3, ISSUE 3, JUNE 2025 ISSN: 3030-334.
10. Zhang, K.; Chen, S.C.; Whitman, D.; Shyu, M.L.; Yan, J.; Zhang, C. A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing 2003, 41, 872–882. [CrossRef]
11. Zhang, W.; Qi, J.; Wan, P.; Wang, H.; Xie, D.; Wang, X.; Yan, G. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sens. 2016, 8, 501. [CrossRef]
12. Chen, N.; Wang, N.; He, Y.; Ding, X.; Kong, J. An improved progressive triangular irregular network densification filtering algorithm for airborne LiDAR data. Front Earth Sci. 2023, 10, 1015153. [CrossRef].