

Гиперспектр буюу хэт олон сувагт LCTF камер ашиглан улаан хилийн өнцгийн коэффициент, навчны гадаргын индекс тодорхойлох

О.Баярцэцэг¹, Ө.Баярсайхан², Д.Эрдэнэбаатар¹, Т.Төртогтох¹,
М.Отгонбаатар¹, Г.Даваадулам³, Т.Бэгзсүрэн^{1,3*}

¹ МУИС, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Физикийн тэнхим

² МУИС, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Биологийн тэнхим

³ ШУА, Физик Технологийн Хүрээлэн, Цацрагийн биофизикийн лаборатори

* begzsuren@num.edu.mn, +976-9977-2782

Энэ судалгааны хүрээнд хэт олон сувагт LCTF (Liquid Crystal Tunable Filter) буюу шингэн кристалл шүүлтүүртэй камерын тусламжтай ургамлын зүйлийг түүний спектр шинж чанарт тулгуурлан ялгаж, навчны талбайн индекс LAI (Leaf Area Index) тооцож гаргах шинэ алгоритмыг туршин үзэв. 2022 оны 7-р сарын эхний долоо хоногт Хар Ямаат байгалийн нөөц газарт хэд хэдэн бодит талбарт LCTF камераар хээрийн ургамлуудын зургийг авч, цуглуулсан зурган мэдээллээс ургаж буй олон зүйлийн ургамлуудын гэрлийн ойлтын спектрийг дүрс боловсруулах аргаар ялгаж, түүгээр спектр сан үүсгэв. Үүсгэсэн сангийн мэдээллээс бид улаан хилийн зурваст тулгуурлан өвслөг ургамлын зүйлийн бүрдлийг тодорхойлох алгоритм туршиж үзсэн. Тухайн алгоритмаар навчны талбайн индексийг мөн тооцож гаргахад эрүүл ургамлыг хагдарсан өвс болон ургамал бус зүйлээс 95% дээш нийлэмжтэй ялгаж байна. Энэ ажлын үр дүнд ургамлын төрөл зүйлийг машинаар олон сувагт камерын тусламжтай өндөр нарийвчлалтай ялгах боломжтойг харуулж байна. Цаашид орчин үеийн хиймэл дагуул, дроноор авсан зургаас уг бидний хөгжүүлсэн алгоритмыг ашиглан хаана ямар төрөл зүйлийн ургамал хэр хэмжээгээр ургаж буйг ялгах боломж бүрдэх юм.

Түлхүүр үгс: Hyperspectral camera, spectral reflectance, leaf area index (LAI), red edge

I. УДИРТГАЛ

Ургамлыг ангилан ялгах нь газрын гадарга дээр ургаж буй ургамлыг зүйлийн бүрдлээр нь ангилж, зураглал хийх үйл явц юм. Ургамлын ангиллыг газар ашиглалт, нөөц тооцох, байгаль орчны менежментэд бүрдэл хэсэг болгон хэрэглэдэг. Төрөл зүйлээр ангилах олон янзын арга байдаг ч [1] орчин үед нарийн бүртгэлийн багаж, түүнд тохирсон алгоритм ашиглан хүний өдөр тутмын ажлыг хөнгөвчлөх төдийгүй алсын зайнаас ажиглан судлах боломж нэмэгдсээр байна. Энэхүү сүүлийн үеийн технологийг ашиглан ургамлын зүйлийн бүрдлийг бусад ус, хөрс, элс, зэрэг зүйлсээс ялган тодорхойлох нь хөдөө аж ахуй, ойн аж ахуй, байгаль хамгаалал зэрэг олон салбаруудад өндөр ач холбогдолтой [2].

Ойн модыг хиймэл дагуул эсвэл дроноор авсан зурагт дүрс боловсруулалт хийх замаар тоолох боломжтой байдаг [3]. Үүнд олон сувагт камер болон ургамал ангилал алгоритмыг хослуулан хэрэглэснээр моддыг хооронд нь ялган ангилж, аль төрөл зүйлийн мод хаана, хэр хэмжээнд ургаж буйг тодорхойлох боломжтой.

Үүний адил ховордсон болон нэн ховордсон төрөл зүйлийн ургамлыг хадгалж, хамгаалахын тулд тухайн ургамлын хаана, хэр хэмжээнд, ямар нөхцөлд ургаж байгааг үргэлж ажиглаж хянах шаардлагатай байдаг. Хээр, алслагдмал газарт орчин үеийн өндөр чадамжтай хиймэл дагуул эсвэл дроноор авсан зурагт ургамлын спектрийн мэдээлэлд тулгуурласан алгоритмыг хоршуулан ашигласнаар ургаж буй талбайг тооцоолохын зэрэгцээ эрүүл болон өвчилсөн ургамлуудыг хооронд нь ялгах боломжтой юм. Мангоны мод болон тухайн газар ургаж байсан ургамлуудын төрөл зүйлийг олон сувагт LCTF камер ашиглан ангилан ялгасан туршлага бий [4].

Хөдөө аж ахуй, газар тариалан эрхэлж буй хувь хүн, аж ахуйн нэгжид тариалангийн талбайд зэрлэг ургамалтай тэмцэх олон арга зам байдаг. Бага талбайд тариалан эрхэлж буй хүмүүс зэрлэг ургамлыг гараар зулгааж физик аргаар тэмцэх боломжтой байдаг хэдий ч энэ арга нь том талбайн хувьд цаг хугацаа, ажиллах хүч ихээр шаарддаг. Иймд том талбайд үүнийг химийн аргаар буюу хүнсний ургамалд хор

цацах байдлаар түлхүү шийдэж байна. Хогийн ургамал устгагчаар пестицид гэдэг химийн бодис түлхүү хэрэглэдэг [5]. Ингэж хор цацах нь орчинд болон эргээд бидний хэрэглэж буй хоол хүнсээр дамжин хүний эрүүл мэндэд аюул учруулж болзошгүй [5,6]. Иймд тариалангийн талбайд зэрлэг ургамлыг хорт бус аюулгүй аргаар ялган авах технологийг хөгжүүлэх шаардлага гарж байна. Үүний тулд олон сувагт камерын зургаас ургамлын спектрийн мэдээллийг ялган авах, ургамлын зүйлийн бүрдлийг тодорхойлох шинэ алгоритм гарган авах, цаашлаад түүнд тулгуурлан машин сургах, хиймэл оюун ухааныг (machine learning, AI) алгоритмд ашиглах зорилтоор судалгааг хийж эхлүүлсэн.

Экологи, байгаль хамгааллын асуудлаар зөв шийдвэр гаргах, үр дүнтэй менежмент сонгох, экосистемийн нарийн төвөгтэй үйл явцыг ойлгоход цаг хугацаа, орон зайн мэдээлэл зайлшгүй шаардлагатай. Эдгээр мэдээлэл нь хүрээлэн буй орчны өөрчлөлтөд үзүүлэх экологийн хариу урвалын тоон үзүүлэлтийг тодорхойлох, мэдээлэлд суурилсан урьдчилсан экологийн загварыг боловсруулахад чиглэгддэг [7]. Мэдээлэлд дүн шинжилгээ хийх нарийн төвөгтэй ажлыг өөрөө суралцах алгоритмуудтай хослуулан автоматжуулах нь урт хугацааны хяналт, оновчтой менежментийн шийдвэр гаргахад чухал нөлөөтэй. Ялангуяа хүний нөлөөллөөс шалтгаалан системүүд өөрчлөгдөж байгаа үед иж бүрэн, хэмнэлттэй, байнгын үнэн зөв мэдээллээр хангана [8]. Иймд бид энэ чиглэлээр хээрийн судалгаанд болон хэмжих үйл явцад орчин үеийн хамгийн дэвшилтэд технологи нэвтрүүлэх, ашиглах зорилго тавьсан.

Дээрх зорилгын хүрээнд Хар Ямаат байгалийн нөөц газарт очиж 2022 оны 7-р сарын эхэнд бодит хэмжилтийг хээр хэд хэдэн талбар байршилд хийж, тэдгээрийг бидний хөгжүүлсэн алгоритмын тусламжтай боловсруулсан арга зүй, үр дүнг энд танилцуулах болно.

II. АРГА ЗҮЙ

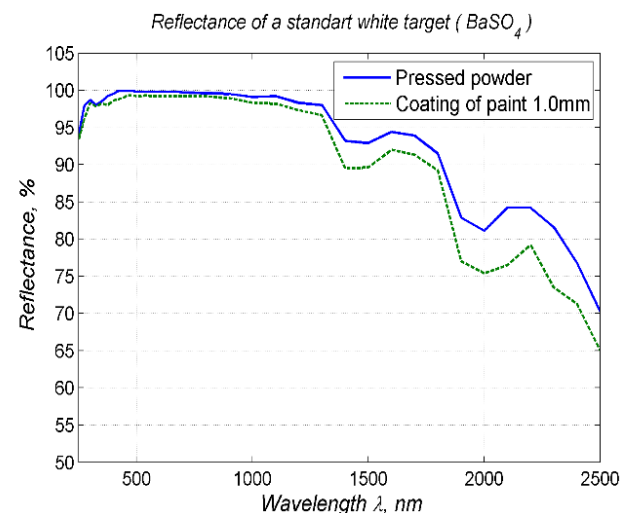
Үндсэн физик тодорхойлолтын хувьд агаарын онгоц болон сансрын хиймэл дагуулын

$$BRF(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_r^{id}} = \frac{dA \int_{\omega_r} \int_{\omega_i} f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) d\Omega_r d\Omega_i}{\frac{dA}{\pi} \int_{\omega_r} \int_{\omega_i} E(\theta_i, \phi_i, \lambda) d\Omega_r d\Omega_i} \quad (1)$$

тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэнэ. Энд $E(\theta_i, \phi_i, \lambda)$ нь гэрлийн үүсгэврээс гарч буй эрчим, $L_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)$ нь дээжээс ойж буй цацраг, θ_i тусгалын өнцөг, θ_r ойлтын өнцөг, ϕ_r азимут өнцөг тус тус юм. Эдгээр цацрагийн урсгалыг ижил төхөөрөмжөөр хэмжихэд гэрэл туссан

оптик мэдрэгчүүд спектрийн цацрагт тааруулан тохируулга хийгдсэн байдаг. Спектрийн цацраг нь нэгж долгионы урт, тухайн цацрагийн нэгж талбай дахь, нэгж өнцөгт ноогдох гэрлийн цацрагийн урсгал бөгөөд СИ системийн нэгжээр $[Вт м^{-2} sr^{-1} nm^{-1}]$ байна. Ойсон гэрлийн эрчмийг $(I [Вт м^{-2}])$ тусгасан гэрлийн эрчимд $(E [Вт м^{-2}])$ харьцуулсан харьцааг гэрлийн ойлт гэж нэрлэнэ. Энерги хадгалагдах хуулиар гэрлийн ойлтын тоон хязгаар 0-ээс 1-ийн хооронд эрэмбэлэгдэнэ. Ойлтын фактор гэдэг нь долгионы уртын бүх мужид дээжийн гадарга дээр ойсон цацрагийн хэмжээг гэрэл тусгахад энерги алдагдалгүй, зүг бүрт адил хэмжээнд гэрэл цацаргадаг (Ламбертын гадарга) стандарт гадаргууд ойсон цацрагийн урсгалд харьцуулсан коэффициент юм. Гэрлийн ойлтын фактор нь тухайн гадаргын шинж чанар гялгар байвал 1-ээс их утгатай байж болно. Жишээ нь гэрлийн ойлтын фактор цасны хувьд 1-ээс их байна [9].

Чиглэлтэй ойлтын факторын (Bidirectional reflectance factor BRF) математик тодорхойлолт нь дээжээс ойсон цацраг $d\Phi_r$ болон идеаль



Зураг 1. Жишиг цагаан материал $BaSO_4$ гэрлийн ойлтын спектр.

Ламбертын гадаргаас ойсон цацраг $d\Phi_r^{id}$ хоёрын харьцаагаар тодорхойлогдоно [10–12]. BRF нь

гадаргуугийн талбай dA нь Ламбертын идеаль гадаргуугийн талбай dA -тай ижил байх ёстой. Харгалзах тэгшитгэлд (1) BRF нь хос чиглэлт тусгал түгэлтийн функцээс (BRDF) хувийн утга нь π дахин их байна.

$$BRF(\theta_i, \phi, \theta_r, \lambda) = \pi \cdot BRDF(\theta_i, \phi, \theta_r, \lambda) = \frac{L_r(\theta_i, \phi, \theta_r, \lambda)}{L_r^{id}(\theta_i, \lambda)} \quad (2)$$

Ургамлын харьцангуй гэрлийн ойлтын фактор BRF тодорхойлохын тулд спектрийн бүх мужид гэрлийг бүрэн ойлгодог жишиг цагаан материал ашигладаг [13]. Үүнийг түлхүү барийн сульфат (BaSO_4) ашиглан хийдэг ба ойлтын шинж чанарыг нь тодорхойлсон цагаан цаас мөн ашиглах боломжтой. Ургамлын BRF-ийг хэмжсэн судалгаанд гэрлийн ойлтыг нь урьдчилж хэмжсэн материалыг ашигласан тохиолдол бий [14]. Энэ нь сарнисан тусгалын хэмжилтэд стандарт болгон ашигладаг цагаан материал юм. Жишиг цагаан материал дээр ойсон L_r^{id} гэрлийн эрчмийг θ_i тусгалын өнцгөөс хамааруулж дараах байдлаар илэрхийлнэ.

$$L_r^{id}(\theta_i, \lambda) = \frac{L_r^{Ba}(0, \lambda) \cdot \cos \theta_i}{\rho^{Ba}} \quad (3)$$

Олон сувагт LCTF камерын зурган мэдээллийг боловсруулахад MATLAB программчлалын орчинд скрипт код бичиж тооцооллыг гүйцэтгэсэн. Энэ камерыг ашиглан хэрхэн ойлтын фактор тооцсон талаар техник хангамж хэсэгт дэлгэрүүлэн бичсэн.

III. СУДАЛГААНЫ ТАЛБАР

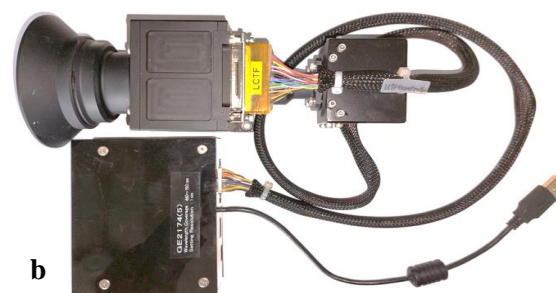
Тухайн судалгааг Хар Ямаат БНГ-т хийсэн бөгөөд хэмжилтийн үеэр ургамал судлаачаар тухайн сонгогдсон ургамлуудыг нэрлүүлэн монгол болон латин нэрийг нь урьдчилж тэмдэглэж авсан.

IV. ТЕХНИК ХАНГАМЖ

Спектрофотометрийн туршилтын төхөөрөмж илүү ухаалаг, жижиг, илүү хэмнэлттэй болж байна. Спектрофотометрээр гэрлийн ойлт, нэвтрэлтийг хэмжих аргыг шинжлэх ухаанд илүү түлхүү ашигладаг, тухайлбал, өнгөт материал бүтээх, химийн шинжилгээ, үйлдвэрийн чанарын хяналт, эмийн туршилт, эмнэлгийн шинжилгээ (цус), ургамлын өсөлт, эрүүл мэндийн ажиглалт, гэрэл ялгаруулах төхөөрөмжийн туршилт, хүнсний эрүүл мэнд болон хяналт, бохирдлын хэмжилт гэх мэт. Гиперспектр буюу хэт олон сувагт камерын пиксел бүрийг спектрофотометр болгон ойлтын спектрийг хэмжих судалгааны хэрэгсэл, багажаар ашиглаж болно.

Уламжлалт спектрофотометр нь цоорхой нимгэн зурвасаар гэрэл нэвтрүүлж түүнийг призм эсвэл диффракцийн тор дээр тусгаж дисперс үүсгэдэг. Фото элементүүд буюу оптик мэдрэгчүүд дээр тус дисперслэгдсэн гэрэл тусахад тус бүр долгионы уртууд дахь эрчмүүдийг бүртгэнэ. Энэ үйл явц нь олон

өнгийн цацрагийг спектрийн бүрэлдэхүүн хэсгүүдэд салгах боломжийг олгодог. Гол анхаарал татдаг параметр нь өндөр мэдрэмж, бага алдаа болно. Сүүлийн үед өргөн хэрэглэгддэг спектрийн хэмжилтийн төхөөрөмж нь гиперспектр камер бөгөөд өөрөөр хэлбэл үүнийг хоёр хэмжээст спектрофотометр гэж үзэх



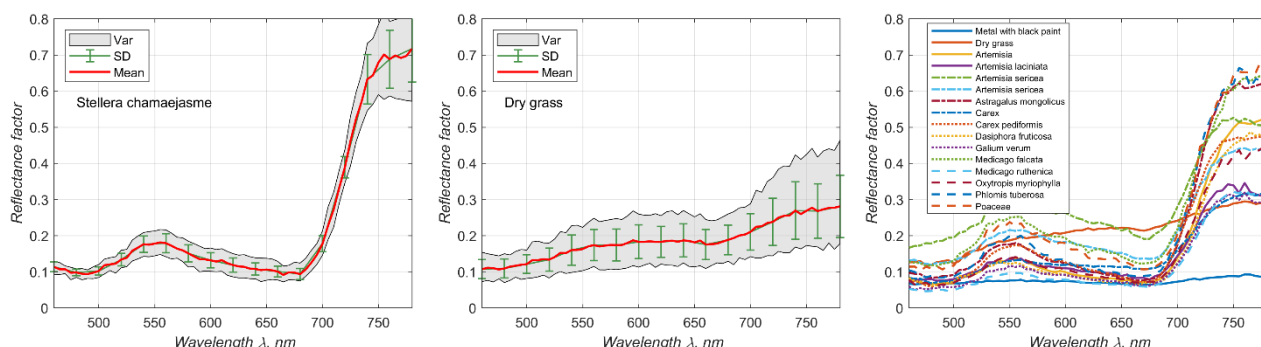
Зураг 2. а. Хээрийн талбайн бодит хэмжилт, б. МУИС-д байгаа LCTF камер.

боломжтой [15].

Хээрийн судалгаанд ургамлын спектрийг бүртгэж авахад LCTF сансрын гиперспектр камер ашигласан. Тус камерын ижил загварыг Филиппиний дэлхийг ажиглах анхны бичил хиймэл дагуул “DIWATA-1, 2” болон Японы “Rising-2” микро хиймэл дагуулд [16] суурилуулсан бөгөөд Genesis корпорац үйлдвэрлэсэн. Энэ камер нь 460 нм-ээс 780 нм хүртэлх долгионы уртын зурваст 1 нм тутамд зураг авах чадамжтай. CCD элементийн пикселийн хэмжээ нь 656 x 494 пикселийн орон зайн нарийвчлал юм. Хэвтээ ба босоо харах өнцөг нь 68.78°, 53.34° градус байна. LCTF камер нь хоёр гаралтын файлдаг: 8 битийн зураг, таслалаар тусгаарлагдсан утгууд (CSV) бүхий 10 бит хүснэгтэн мэдээлэл. Хоккайдо их сургуулийн судлаачид [4] бидний хэрэглэж байгаа камертай ижил төрлийн камерын зургуудад машин сургалтын алгоритмыг ашиглан спектрийн ойлтыг үндэслэн 94.5% нарийвчлалтай ургамлыг

ялган ангилсан газрын зургийг амжилттай гаргажээ.

гэрлийн өөр өөр долгионы уртад харгалзах гэрлийн ойлтын факторыг жиших аргаар



Зураг 3. **a.** Одоо далан түрүүний ойлтын спектр, спектруудийн өөрчлөлт, стандарт хазайлт; **b.** хагдарсан өвсний ойлтын спектр, спектруудийн өөрчлөлт, стандарт хазайлт; **c.** ургамлуудын ойлтын дундаж утгууд латин нэршилээр.

МУИС-ийн зөөврийн LCTF камерыг энэ судалгаанд ашигласан ба түүний оптик харах дунд цэгийн тэнхлэгийг эгц доош газартай перпендикуляр чиглэлд нэг метрийн өндөрт суурилуулан талбайн зураг авсан. Камерыг тогтоогч суурь нь 1.0×1.0 м хэмжээтэй дөрвөлжин хэлбэртэй төмөр хүрээ юм. Тухайн камер нь спектрийн 460 – 780 нм мужид 1 нм алхамтай хэмжилт хийх боломжтой. Харин энэхүү судалгааны хүрээнд 460 – 780 нм мужид 5 нм алхамтай нийт 65 сувгаар зургийг 11 өөр байршилд авч хадгалсан. Зураг 2-г хээрийн хэмжилтийн бодит байдал ба МУИС-д хэрэглэж буй камерыг харуулав.

LCTF камер нь хэд хэдэн линз, шингэн кристалл шүүлтүүр, USB холболттой CCD массив мэдрэгчээс бүрдэнэ. Тохируулах шүүлтүүр нь компьютерын удирдлагатай тэжээлээр шууд холбогддоггүй тул хээрийн нөхцөлд ашиглах зориулалтаар зөөврийн батареийг хамт авч явдаг. Шүүлтүүрийг програмчлах боломж бүхий гет массив (FPGA) нэгжээр дамжуулан компьютерын USB портоор удирддаг.

V. ҮР ДҮН БА АЛГОРИТМ

Судалгааны хэмжилтийн талбар бүрд 65 өөр спектрийн сувгаар 460 – 780 нм долгионы уртын мужид 5 нм алхамтай зургууд болон “CSV” форматтай өгөгдлүүдийг хадгалан авсан. Тэдгээр өгөгдлүүдээс улаан (670 нм), ногоон (560 нм), цэнхэр (460 нм) өнгийн гурван сувгаар авсан зургуудыг нийлүүлэн “RGB” буюу нийлмэл гурван өнгөт нэг зургийг гаргаж авсан (Зураг 6.а).

5.1. Өвслөг ургамлын спектр

Улмаар тус зургаас тодорхой хэсэг ургамлуудын тус бүрийн 10 өөр навчнаас тодорхой хэсэг бүлэг пикселүүдийг сонгон авч,

харьцангуй тооцон гаргаж авсан. (2) тэгшитгэлд тодорхойлсон гэрлийн тусгалын өнцөг θ_i , харьцангуй азимут ϕ -г зураг авах үеийн цагаар тодорхойлж авсан. Камераа бид эгц доош харуулан авч буй учир гэрлийн ойлт ϕ -гээс хамаарал үгүй, мөн θ_r -ийн утгыг тэгтэй тэнцүү байсан гэж авч үзэж болно. Энэ тохиолдолд LCTF камерын хувьд ойлтын факторыг дахин тодорхойлбол:

$$RF(\lambda) = \frac{DN(\lambda) - B}{DN_w(\lambda) - B} \quad (4)$$

болно. Энд, DN – тухайн хэмжиж буй дээжийн пикселийн утга, DN_w – цагаан жишиг материалын пикселийн утга, λ – долгионы урт, B – тухайн оптик дэвсгэр фон утга.

Оптик спектрометрийн тохируулга (калибраци), баталгаажуулалт, хэмжилтийн алдааг үнэлэх, багасгах нь зайнаас тандан судлал, оптик хэмжилтэд чухал ач холбогдолтой бөгөөд [10] судалгаанд ойлт, тусгалын ойлголтыг тодорхойлж аргачлалыг тодорхой болгосон. Гиперспектр LCTF камерыг Хоккайдогойн их сургуулийн Сансрын даалгавар судлах төвд дотроо бүрэн ойлттой цагаан материалаар бүрсэн бөмбөрцөг (integrating sphere) ашиглан тохируулж, баталгаажуулсан [15]. Тус тохируулгыг хийхэд камерын пикселийн утгууд гэрлийн тусгалын эрчимтэй шууд пропорциональ хамааралтай байсан тул (2) тэгшитгэлийн гэрлийн эрчмийг камерын пикселийн утгаар сольж болно. Мөн оптик дэвсгэр фоны утга B нь 29 – 32 утгын хооронд олдож байсан. Энэ ажилд $B = 30$ утгаар авсан.

Нийт 27 өөр зүйлийн ургамлын гэрлийн ойлтын фактор спектрийг дүрс боловсруулах аргаар ялган авч мэдээллийг хадгалан авсан. Түүнээс 14 ургамлын, хуурай хатсан өвсний, хар будгаар будсан төмрийн спектрийг Зураг 3.с-д

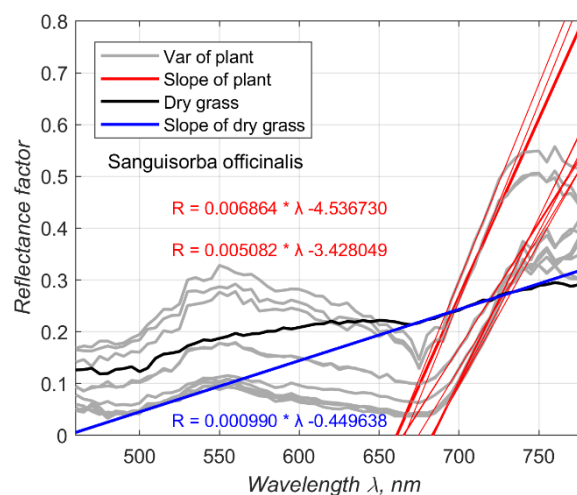
үзүүлэв. Зураг 3.а-д Одой далан түрүүний гэрэл ойх факторын дундаж спектрийн утгыг улаан өнгөөр, стандарт хазайлтыг ногоон өнгөөр тэмдэглэн, тухайн зүйлийн ургамлын өөр өөр навчны спектрийн өөрчлөлтүүдийг хамгийн ихээс хамгийн бага хүртэл нил саарал өнгөөр бүрж харуулсан. Зураг 3.б-д хуурай хагдарсан өвсний хэмжилтийн мэдээллийг харуулсан ба тэмдэглэгээ нь өмнөх Зураг 3.а-тай адилхан. Ногоон эрүүл ургамлын спектрийн нийтлэг шинж чанар нь цэнхэр болон улаан өнгийн гэрлийн шингээлт өндөртэй, ногоон өнгийн бага зэрэг ойлттой, үл үзэгдэх хэт улаан туяаны мужид өндөр ойлттой байдаг болохыг энэ хэмжилтийн утгууд батлан харуулж байна.

5.2. Навчны гадаргын индекс (LAI)

Судалгааны ажлын гол зорилго тухайн газрын нэгж талбайн навчны бүрхэлтийн хэмжээ буюу навчны гадаргын индекс LAI-ийг тодорхойлох боловч LCTF камераар авсан хэмжилтийн үр дүн спектрийн талаар нарийн мэдээллийг агуулах тул хэд хэдэн машин сургалтын алгоритмуудаар ургамлыг төрөл зүйлээр нь ангилах туршилтыг хийсэн. Эдгээр алгоритмуудыг ашиглах явцад тодорхой амжилттай үр дүнд хүрээгүй. Туршиж үзсэн машин сургалтын алгоритмуудыг дурдвал “k-nearest neighbors (KNN)”, “K-means”, “Support Vector Machine (SVM)”, “Artificial Neural Networks (ANN)”. Зайнаас тандан судлалын чиглэлээр том талбайн ургамлыг ангилан ялгасан оролдлого олон [17–19].

Хээрийн хэмжилтэд 1 м^2 талбайд ургадаг зүйлийн бүрдэл нь ихэвчлэн арав орчимд эрэмбэлэгдэнэ. Мөн нарны тусгалын өнцгөөс хамааран өндөр ургамлын сүүдэр өөр ургамлын эсвэл өөрийн навч дээр тусахад тухайн навчны гэрлийн ойлтын эрчим өөрчлөгдөнө. Зураг 4-т нэг зүйлийн ургамлын гэрэлтүүлэг өөр өөр байгаа буюу сүүдэр туссан болон нар туссан навчнуудын спектрийг саарлаар зурж харуулсан. Хэрэв ургамлын навч дээр сүүдэр, эсвэл гэрэлтүүлэг багассан бол спектр нь үзэгдэх гэрлийн мужид жигд 0.10-аас 0.18 утгаар, инфра улаан гэрлийн мужид 0.12-оос 0.20 утгаар ойлтын фактор нь буурч байв. Навчинд сүүдэр туссан тохиолдолд машин сургалтын алгоритмуудаар уншуулахад тухайн хэсгийг хагдарсан өвс, шороо байна гэж үзэх хамгийн түгээмэл алдаа байв.

Хэдий зарим ургамлын навчинд сүүдэр туссан ч ургамлын спектрийн үүсгэж буй муруй хэлбэрээ хадгалж, босоо тэнхлэгийн дагуу шилжсэн харагдаж байв. Ногоон ургамлын бас нэг өвөрмөц оптик чанар нь улаан хилийн зурвас гэж нэрлэгдэх цахилгаан соронзон спектрийн хэт



Зураг 4. Сүүдэр туссан болон нар туссан навчнуудын спектрийн ялгаа болон хагдарсан өвсний спектр. Тэдгээрийн өнцгийн коэффициент.

улаан туяаны мужид гэрлийн ойлтын муруй хурдацтай өсөж буй бүсийг хэлнэ. Ургамалд агуулагдах хлорофилл нь спектрийн харагдах хэсгийн гэрлийн ихэнх хэсгийг шингээдэг боловч 700 нм-ээс дээш долгионы уртад шингээлт харьцангуй бага болдог. Үүний улмаас 680 нм-ээс 730 нм хүртэлх долгионы уртад гэрлийн ойлтын фактор 5%-аас 50% хүртэл өсөж болно.

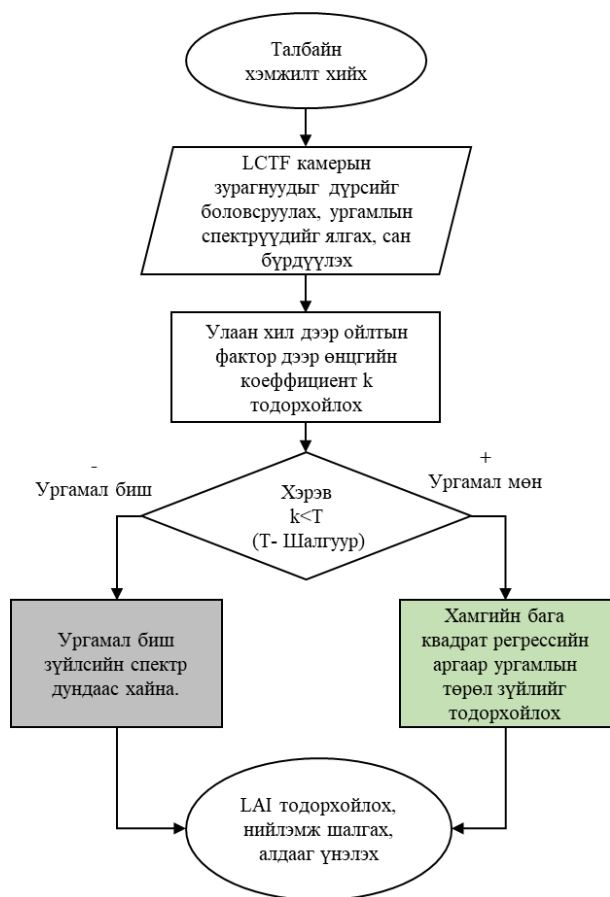
Спектрийн өгөгдлөөс улаан хилийн зурвас буюу 700, 705, 710, 715, 720 нм долгионы уртуудад харгалзах ойлтын факторын утгуудад үндэслэн өнцгийн коэффициент хэмжилт тус бүрд тооцож үзсэн. Зураг 4-т өнцгийн коэффициент хэмжилт тооцож шулууны тэгшитгэлийг графикт давхар харуулсан. Дээрх ургамлын ойлтын спектрт бодуулсан өнцгийн коэффициент k нь нар туссан навчны хувьд $6.80 \times 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$, гэрэлтүүлэг багатай сүүдэр туссан навчнуудын хувьд $5.10 \times 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$ орчимд тус тус үнэлэгдэж байв. Тэгвэл сүүдэр туссан навчтай андуурагдаж байсан хагдарсан өвсний улаан хилийн зурваст өнцгийн коэффициент $0.81 \times 10^{-3} \text{ нм}^{-1}$ орчимд тооцогдож ойролцоогоор 6 дахин буюу 84%-ийн зөрүүт үүсгэж байна. Энэ нь ногоон ургамлыг хагдарсан өвс, бусад зүйлсээс ялган ангилах маш сайн шалгуур болж чадна.

5.3 Ангиалан ялгах шинэ алгоритм

Эдгээр шинж чанарт тохируулан навчны талбайн индекс LAI бодох арга, цаашлаад ургамлыг төрөл зүйлээр нь ангилан ялгах алгоритмыг тодорхойлсон. Зураг 5-д LAI тооцоолох, ургамлыг төрөл зүйлээр ангилах ялгах алгоритмын схемийг үзүүлэв. Талбайн хэмжилт хийгдсэний дараа LCTF камерын зураг, өгөгдлүүдийг цуглуулан боловсруулж ургамлын ойлтын спектрийн факторуудыг ялган авна.

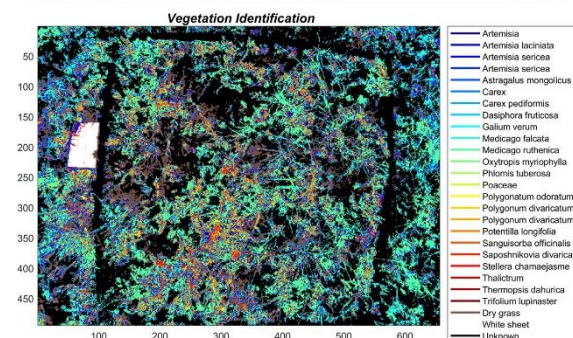
Эдгээр ургамлын спектрийн мэдээлэл үнэ цэнтэй мэдээлэл тул 10 орчим өөр өөр навчнуудын спектрийн мэдээллийг сан болгон хадгална. Улмаар тэдгээр навчнуудын гэрлийн ойлтын дундаж утга, өөрчлөлт, стандарт хазайлтыг тооцох зэрэг статистик боловсруулалтыг хийнэ.

Анхны боловсруулаагүй зурган матрицын пиксел тус бүрд гэрлийн ойлтын факторыг тодорхойлж тус пикселийн спектрийн хувьд улаан хилийн зурваст өнцгийн коэффициент бодож олно. Хэрэв тухайн коэффициент нь тодорхой тест утгаас их байвал (Жишээ нь $T > 0.50 \times 10^{-3} \text{nm}^{-1}$) тухайн пикселийг ногоон ургамал гэж үзнэ. Харин түүнээс доош утгатай байвал ургамал биш бөгөөд спектрийг ургамал биш хагдарсан өвс, шороо, жишиг цагаан, материал, хар будгаар будсан төмөр гэх мэт зүйлсийн спектртэй ойролцоог шалгаж тухайн материалыг нэрлэнэ.



Зураг 5. LAI тодорхойлох, ургамлыг төрөл зүйлээр ангилах ялгах шинэ алгоритм.

Улаан хилийн зурваст өнцгийн коэффициент нь их буюу ургамал мөн гэж тогтоогдвол тухайн пикселийн нийт 65 сувгийн утгыг тус бүр санд хадгалагдсан ургамлынхтай харгалзуулан жишиж, хамгийн бага квадратын аргаар хамгийн ойр утгатайг олж тогтооно. Хэрэв ургамлын навчинд сүүдэр туссан байх магадлалтай ойлтын



Зураг 6.а. Өнгөт RGB зургыг LCTF камерын өгөгдлөөр зурсан байдал, б. Ургамлыг төрөл зүйлээр өнгөөр ангилан ялгаж харуулав.

фактор бага байвал харилцан адилгүй тодорхой хувиар өсгөж хайж үзнэ. Төгсгөлд нь тухайн нэг хэмжилтийн талбарт камерт орсон газрын хувьд хэдэн пиксел нь ургамал, хэдэн пиксел нь ургамал биш гэсэн тоон мэдээллээс LAI-ийг бодож гаргана. Хэрэв тухайн пикселд харгалзах ургамлын спектртэй ойролцоо спектрийг тогтоосон бол тухайн пикселийг өнгөөр будаж нэрлэнэ. Ингэж нэрлэсэн матрицаар шинэ зураг болгон үүсгэнэ. Ургамал бүрийг өнгөөр илэрхийлэн кодолсон.

Судалгааны явцад үүсгэсэн спектрийн санд тулгуурлан ургамал ангилах алгоритмыг ашиглаж, хэмжилтийн талбаруудаас нэгийг сонгон авч дүрс боловсруулсныг Зураг 6.б-д үзүүлэв. Ингэж боловсруулсан дүрснээс навчны талбайн индекс LAI-ийг тооцон гаргахдаа улаан хилийн зурваст налалт өндөртэй пикселийг ургамал гэж үзсэн бөгөөд тухайн талбарт 0.3963 буюу талбайн 40%-ийг ногоон ургамал эзэлж байгааг илэрхийлж үр дүн жишээ зурагт гарсан.

Алгоритм талбарт авсан фото зургаас харж хүний нүдээр хил хязгаарыг тогтоосон ургамлын төрөл зүйлтэй 85%-иас илүү нийлэмжтэй байна.

VI. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Алгоритм талбарт авсан фото зургаас харж хүний нүдээр хил хязгаарыг тогтоосон ургамлын

төрөл зүйлтэй нилээд өндөр хувьтай нийлж байгаа боловч нүдээр харахад бүхэл нэг ургамлыг өөр ургамал мэтээр дүрслэн харуулсан алдаа гарч байна. Өгүүллийг бичиж буй судлаачид үүнийг навчны гадарга дээрх гялтайн ойх буюу спекуляр ойлттой холбон тайлбарлаж байна. Нарны гэрэл нь эхлээд навчны гаднах давхаргатай тулгардаг бөгөөд энэ нь тунгалаг давхарга байдаг. Энэ тунгалаг байдлын оптик шинж чанар нь шилтэй төстэй гэсэн үг юм. Хэдийгээр бид дээд эпидермис ба мезофиллийн давхаргыг харж чаддаг ч хурц гэрлийн тусгалын өнцгөөр навчны гэрлийн ойлт илт нэмэгддэг. Энэ тохиолдолд навчны ойсон гэрлийн туйлшралыг авч үзэх ёстой. Навчны туйлширсан тусгал нь 2 орчны гадаргад ойх ойлттой холбоотой. Тиймээс ойсон гэрлийн бүрэлдэхүүн хэсэг нь навчны гадаргуугаас (wax cuticle) ойдог бөгөөд диффуз ойлт биш гэдгийг [20–23] судалгаануудаар баталдаг. Навчны гэрлийн ойлтын спектр нь ургамлын дотоод найрлагаас бус бас гадаад давхаргаас хамаарна гэдгийг харуулж байна.

Ойрын зайнаас газарт ургаж буй ургамлыг 3 мм доош орон зайн нарийвчлалтай гиперспектр камераар авсан хэмжилт одоо хэвлэгдсэн судалгаануудаас шууд хайж олдохгүй байна. Энэ нь уг ажил хамгийн өндөр орон зайн нарийвчлалтай ургамлыг ялган ангилах оролдлого болсон байж болзошгүйг илтгэж байна. Энэ 3 мм орон зайн нарийвчлалыг камераар авсан зургын хамрах талбай хэдэн пикселд багтаж байгаагаар тооцсон. Судалгаатай холбогдож уншигдсан [4,17–19,24,25] өгүүлүүдэд илүү зайнаас тандан судлал тал руугаа дрон, хиймэл дагуулын өгөгдөл ашигласан байна.

Энэ судалгаанд хэт олон сувагт LCTF камер хэрэглэгдсэн ба үүнтэй ижил төрлийн камераар дроны тусламжтай талбайн хэмжилтийг [4] Хоккайдо их сургууль болон Филиппин улс хамтран хийсэн. Уг судалгаанд Мангоны модоор сүүдэрлэсэн хэсгийг таньж чадалгүй хараар тэмдэглэн үлдээсэн байдаг. Тэгвэл бидний хөгжүүлсэн өнцгийн коэффициент бодох аргачлалаар баяжуулбал илүү өндөр нарийвчлалд хүрэх боломжтойг харуулж байна.

VII. ДҮГНЭЛТ

Физикийн тэнхимийн багш, оюутнууд Хар Ямаат байгалийн нөөц газарт очиж экологи, байгаль хамгааллын чиглэлээр судалгаа хийдэг групптэй хамтран ажиллаа. Хэт олон сувагт LCTF камераар хэд хэдэн бодит талбарт хээрийн

ургамлуудын зургийг авсан ба тус камерын пиксел бүр нь спектрофотометр болох өндөр чадавхыг харуулж байна. Өөрөөр хэлбэл тус камерыг хоёр хэмжээст спектрофотометр гэж үзэх боломжтой. Сүүдэрт нуугдсан навчнууд ургамлын зүйлийг ангилах алгоритмуудад танигдахгүй хоосон зай үүсгэж байсан бол энэ өгүүллээр авч үзсэн улаан хилийн зурваст гэрлийн ойлтын өсөлтийн налууг тооцох аргачлалаар ургамлыг төрөл зүйлээр ангилах, нарийвчлалыг илт сайжруулах боломжтойг харуулав. Тухайн аргачлалыг үндэслэн LAI тодорхойлох шинэ алгоритм зохиосон.

Улаан хилийн зурвасын шинж чанарт тулгуурлан өвслөг ургамлын зүйлийн бүрдлийг тодорхойлох алгоритм зохиосон. Хэт олон сувагт камераар төрөл зүйлээр нь ангилан ялгах ажил тун цөөн судлагдсан тул корреляцийн коэффициентийг тооцох нарийн аргачлал байхгүй байна. Гэвч тухайн цагт авсан фото зураг, нэршлээр ялгасан матрицтай харьцуулахад алгоритм ойролцоогоор 85% нийлэмжтэй ажиллаж байна. Үүсгэсэн сангийн мэдээллээс навчны талбайн индекс тооцох алгоритмыг бичиж хөгжүүлсэн. Эрүүл ургамлыг хатсан өвс болон ургамал бус зүйлээс 95% дээш нийлэмжтэй ялгаж байна.

LCTF олон сувагт камерын бүртгэсэн мэдээллээс машин сургах алгоритмаар ургамлын төрөл зүйлийг ялгах боломжтой. Цаашид хиймэл оюун ухаан машин сургалт ашиглан ургамлыг таних алгоритм зохиож ажиллуулснаар хээрийн хэмжилт, экологийн судалгааг илүү хурдан нарийвчлал өндөр хийж гүйцэтгэх боломжтой.

VIII. ТАЛАРХАЛ

Энэ судалгаа нь ШУТС, #CHN-2022/273 тоот төсөл болон P2020-3983 “Спектр туйлширсан гэрлийн ойлт чиглэлээс хамааруулан хэмжих, өгөгдлийн сан бүтээх” МУИС-ийн өндөр түвшний судалгааны төслийн санхүүжилтээр хийгдэв.

IX. НОМ ЗҮЙ

- [1]Lowe S, Ball DL, Reeves MK, Amidon F, Miller SE. Hawai'i: Mesic forests. Encyclopedia of the World's Biomes 2020;3–5:346–72.
- [2] Talaviya T, Shah D, Patel N, Yagnik H, Shah M. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. Artificial Intelligence in Agriculture 2020;4:58–73.

- [3] Yao L, Liu T, Qin J, Lu N, Zhou C. Tree counting with high spatial-resolution satellite imagery based on deep neural networks. *Ecol Indic* 2021;125.
- [4] Ishida T, Kurihara J, Viray FA, Namuco SB, Paringit EC, Perez GJ, et al. A novel approach for vegetation classification using UAV-based hyperspectral imaging. *Comput Electron Agric* [Internet] 2018 [cited 2018 Aug 13];144:80–5. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917310499>
- [5] Grube A, Donaldson D, Kiely T, Wu L. Pesticide Industry Sales and Usage Report: 2006 and 2007 Market Estimates. 2006.
- [6] Caiati C, Pollice P, Favale S, Lepera ME. The Herbicide Glyphosate and Its Apparently Controversial Effect on Human Health: An Updated Clinical Perspective. *Endocr Metab Immune Disord Drug Targets* 2019;20:489–505.
- [7] Lindenmayer DB, Likens GE, Andersen A, Bowman D, Bull CM, Burns E, et al. Value of long-term ecological studies. *Austral Ecol* [Internet] 2012 [cited 2023 Apr 13];37:745–57. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1442-9993.2011.02351.x>
- [8] Ditria EM, Buelow CA, Gonzalez-Rivero M, Connolly RM. Artificial intelligence and automated monitoring for assisting conservation of marine ecosystems: A perspective. *Front Mar Sci* 2022;9:1313.
- [9] Painter TH, Dozier J. Measurements of the hemispherical-directional reflectance of snow at fine spectral and angular resolution. *J Geophys Res* [Internet] 2004 [cited 2019 Jan 8];109:D18115. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2003JD004458>
- [10] Nicodemus F, Richmond J, Hsia J, Ginsberg I, Limperis T. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. 1977 [cited 2018 Feb 22]; Available from: <https://graphics.stanford.edu/courses/cs448-05-winter/papers/nicodemus-brdf-nist.pdf>
- [11] Walter-Shea EA, Norman JM, Blad BL. Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean. *Remote Sens Environ* 1989;29:161–74.
- [12] Schaepman-Strub G, Schaepman ME, Painter TH, Dangel S, Martonchik J V. Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote Sens Environ* 2006;103:27–42.
- [13] Grum F, Luckey GW. Optical Sphere Paint and a Working Standard of Reflectance. *Applied Optics*, Vol. 7, Issue 11, pp. 2289–2294 [Internet] 1968 [cited 2023 Apr 13];7:2289–94. Available from: <https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?uri=ao-7-11-2289&seq=0&html=true>
- [14] Walter-Shea EA, Norman JM, Blad BL. Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean. *Remote Sens Environ* 1989;29:161–74.
- [15] BEGZSUREN TUMENDEMBEREL トウメンテンプレル ベグズスレン 北海道大学 Supervisor by, Takahashi Y. STUDY OF SPECTRO-POLARIMETRIC BIDIRECTIONAL REFLECTANCE PROPERTIES OF LEAVES. 2019;
- [16] SAKAMOTO Y, SUGIMURA N, FUKUDA K, KUWAHARA T, YOSHIDA K, KURIHARA J, et al. Development and Flight Results of Microsatellite Bus System for RISING-2. *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN* [Internet] 2016 [cited 2018 Feb 22];14:Pf_89-Pf_96. Available from: https://www.jstage.jst.go.jp/article/tastj/14/ists3/0/14_Pf_89/_article
- [17] Remote Sensing Based Vegetation Classification Using Machine Learning Algorithms | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore [Internet]. [cited 2023 Apr 16]; Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9194217>
- [18] Fu B, Zuo P, Liu M, Lan G, He H, Lao Z, et al. Classifying vegetation communities karst wetland synergistic use of image fusion and object-based machine learning algorithm with Jilin-1 and UAV multispectral images. *Ecol Indic* 2022;140:108989.
- [19] Ahmad AM, Minallah N, Ahmed N, Ahmad AM, Fazal N. Remote sensing based vegetation classification using machine learning Algorithms. 2019 International Conference on Advances in the Emerging Computing Technologies, AECT 2019 2020;
- [20] Grant L. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Remote Sens Environ* 1987;22:309–22.

- [21] Vanderbilt VC, Grant L. Plant Canopy Specular Reflectance Model. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1985;GE-23:722–30.
- [22] Grant L, Daughtry CST, Vanderbilt VC. Polarized and specular reflectance variation with leaf surface features. Physiol Plant [Internet] 1993 [cited 2019 Jan 11];88:1–9. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1399-3054.1993.tb01753.x>
- [23] Grant L, Daughtry CST, Vanderbilt VC. Polarized and specular reflectance variation with leaf surface features. Physiol Plant [Internet] 1993 [cited 2019 Jan 7];88:1–9. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1399-3054.1993.tb01753.x>
- [24] Liu W, Wu EY. Comparison of non-linear mixture models: sub-pixel classification. Remote Sens Environ 2005;94:145–54.
- [25] Nemani R, Running SW. Implementation of a hierarchical global vegetation classification in ecosystem function models. Journal of Vegetation Science [Internet] 1996 [cited 2019 Jan 11];7:337–46. Available from: <http://doi.wiley.com/10.2307/3236277>