

Estimation of leaf loss rate in pest damaged larch forests using Sentinel-2 satellite data

Mungunkhuyag Ariunaa^{1,2,*} Ganbat Dashzeveg¹, Huangxiao Jun³, Bao Yuhai³,
Altantuya Dorjsuren¹, Boldbayar Rentsenduger¹

¹Division of Geographic Information System and Remote Sensing, Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

²School of Environment, Northeast Normal University, Changchun, China

³College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Huhhot, China

*Corresponding author email: mungunkhuyaga@mas.ac.mn

Received: 31 October 2022 / Accepted: 30 November 2022 / Published online: 29 December 2022

ABSTRACT

In recent years, the research on remote sensing monitoring of forest damage has made great progress. The monitoring of forest pest severity using remote sensing methods that are sensitive to the spatiotemporal variations of canopy degradation and leaf lost rate. In this study, two typical conifer pests as *Erannis Jacobsoni* Djak.(EJD) and *Pendrolimus Sibiricus* Tschtv.(PST) are selected for forest area of Binder and Baruunburen in Mongolia. based on the star ground combination model, the spectral reflectance are simulated from Sentinel-2A image, and the spectral index (SI) and spectral derivative feature (SDF) are calculated, the sensitive spectral features of SI and SDF are extracted by combining threshold method and SPA algorithm, and then establish the discrimination model of different pest types based on random forest(RF). At the same time, the monitoring models of pest indicators were constructed, and the severity of pests were identified by FCM fuzzy clustering. The accuracy of RF model based on Sentinel-2A remote sensing simulation data is significantly improved. The spectral index and derivative spectral features of Sentinel-2A remote sensing simulation data have significant sensitivity to the two pest indicators. Using the spectral features of remote sensing simulation data, the indicators of conifer pest can be identified by RF and PLSR algorithm. In the identification of conifer pests based on the non-simulated Sentinel-2A remote sensing data, the estimation accuracy of the two pests' leaf loss rate is the highest.

Keywords: *Sentinel-2A, Remote sensing monitoring, Discrimination model, Leaf loss rate, Erannis jacobsoni Djak, Pendrolimus sibiricus Tschtv*

Сентинел-2 хиймэл дагуулын мэдээ ашиглан хортонд нэрвэгдсэн шинэсэн ойн шилмүүсний алдагдлыг тооцох

Мөнгөнхуяг Ариунаа^{1,2*}, Ганбат Дашзэвэг¹, Хуан Шиао Жун³, Бао Юу-Хай³,
Алтантуяа Доржсүрэн¹, Болдбаяр Рэнцэндүгэр¹

¹Газарзүйн Мэдээллийн Систем, Зайнаас Тандан Судлалын Салбар, Газарзүй, Геоэкологийн Хүрээлэн,
Шинжлэх Ухааны Академи, Улаанбаатар, Монгол

²Зүүн Хойтын Багийн Их сургууль, Чанчун, Хятад

³Газарзүйн Сургууль, Өвөрмонголын Багийн Их сургууль, Хөх Хот, ӨМӨЗО, Хятад

*Холбоо барих зохиогчийн цахим хаяг: tungunghuyaga@mas.ac.mn

Хүлээн авсан: 2022 оны 10 сарын 31 өдөр / Зөвшөөрөгдсөн: 2022 оны 11 сарын 30 өдөр / Нийтлэгдсэн:
2022 оны 12 сарын 29 өдөр

ХУРААНГУЙ

Ойд учирсан хохирол, хор хөнөөлийг зайнаас тандах аргаар судлах судалгаа сүүлийн жилүүдэд ихээхэн ахиц дэвшил гаргаж байна. Зайнаас тандан судлах аргуудыг ашиглан ойн хортон шавжийн ноцтой байдлын хянах, шилмүүсний алдагдлыг тооцох судалгааг Хэнтий аймгийн Биндэр, Сэлэнгэ аймгийн Баруунбүрэн сумын Якобсоны төөлүүр эрвээхэй болон Сибирийн хүр эрвээхэйн хөнөөлд өртсөн шилмүүсэн ойд хийсэн. Хиймэл дагуулын мэдээ болон газар дээрх спектрийн ойлтын үр дүнг хослуулсан загварт үндэслэн Sentinel-2A зургаас спектрийн индекс (SI) болон спектрийн дериватив шинж чанарыг (SDF) тооцоолж, SI болон SDF-ийн спектрийн онцлог шинж чанарыг хослуулан гаргаж авсан. Дараа нь SPA алгоритм болон санамсаргүй ойн (RF) загварчлал дээр үндэслэн өөр төрлийн хортон шавжийг ялгах загварыг бий болгосон. Үүний зэрэгцээ хортон шавжийн үзүүлэлтүүдийн хяналтын загваруудыг гаргаж, хортон шавжийн шилмүүсэнд учруулсан хөнөөлийн байдлыг FCM тодорхой бус кластерчлалаар тодорхойлсон. Үр дүнгээс харахад Sentinel-2A хиймэл дагуулын мэдээний симуляцийн өгөгдөлд суурилсан RF загварын нарийвчлал мэдэгдэхүйц сайжирсан. Зайнаас тандан судлах аргаар симуляци хийсэн өгөгдлийн спектрийн шинж чанарыг ашиглан шилмүүст ойн хортон шавжийн үзүүлэлтүүдийг RF болон PLSR алгоритмаар тодорхойлох боломжтой. Sentinel-2A хиймэл дагуулын загварчлаагүй мэдээлэлд үндэслэн шилмүүст модны хортон шавжийг тодорхойлоход хоёр хортон шавжийн навчны алдагдлын тооцооны нарийвчлал хамгийн өндөр байна.

Түлхүүр үгс: Сентинел-2 хиймэл дагуул, Зайнаас тандан судлал, Мониторинг, Ялгах загвар,
Шилмүүсний алдагдал, Якобсоны төөлүүр эрвээхэй, Сибирийн хүр эрвээхэй

1. ОРШИЛ

Манайд урд өмнө хийгдсэн ихэнх судалгаа шинэсэн ойд хор хөнөөл учруулж буй шавжийн биологийн талаас нь түлхүү судалсан байдаг бол зайнаас тандах аргаар буюу хайпспектрийн мэдээ ашиглан судалсан судалгаа ховор юм [1,2]. Сүүлийн жилүүдэд хайперспектрийн технологи хурдацтай хөгжиж, экологийн аюулгүй байдал улам бүр хурцаар тавигдаж байгаа энэ үед хортон шавжийн хор хөнөөлийг илрүүлэх, таних арга зүй нь тасралтгүй шинэчлэгдэж ирсэн бөгөөд судалгааны үр дүн оновчтой байдгаараа давуу талтай тул газрын болон зайнаас тандан судлах хайпспектрийн технологийг гаднын орнууд түлхүү ашиглаж байна [3,4,6]. Монгол орны хувьд якобсоны төөлүүр эрвээхэйн олшрол болдог ареал нутаг нь

тайгын доод бүст хамаарах Төв, Хэнтий, Булган аймгийн газар нутаг хамаарна [5,7]. Шинэсэн ойн хортон шавжийн хяналт, мониторингийн ажлыг газар дээр нь очиж судлах уламжлалт арга [7] нь том талбайд хурдан шуурхай, үнэн зөв хийх шаардлагыг хангаж чадахгүй байгаа тул зайнаас тандан судлах аргаар судлах нь илүү үр дүнтэй байна [10,11,16]. Иймээс энэхүү судалгаанд орчин үеийн зайнаас тандан судлах технологийг ашиглан навчны алдагдлын түвшинг тооцов [8,14]. Мөн Якобсоны төөлүүр эрвээхэй (*Erannis jacobsoni Djak*) ба Сибирийн хүр эрвээхэйн (*Pendrolimus sibiricus Tschtv*) учруулсан хор хөнөөлийн ялгааг нарийн тогтоохын тулд тухайн хэсэг газрын хиймэл дагуулын мэдээ, газрын өгөгдлийг хослуулан, спектрийн шинж чанарыг ашиглан хортон шавжийг хянах загварыг бий болгож [3,12], шинэсэн ойн хортон шавжийг хурдан бөгөөд үнэн зөв хянах боломжийг олгосон [9,13,15]. Энэхүү судалгаа нь ойн хөнөөлийн байдал, ойн хортон шавжийг зайнаас тандах судалгааны цар хүрээг нэмэгдүүлж, якобсоны төөлүүр болон сибирийн хүр эрвээхэйн гамшгаас урьдчилан сэргийлэхэд чухал ач холбогдолтой юм.

2. МАТЕРИАЛ, АРГАЗҮЙ

2.1 Аргазүй

Шилмүүст ойн хортон шавжийн хор хөнөөлийг зайнаас тандан судлахад Сентинел-2 хиймэл дагуулын B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, b8a зэрэг спектрийн сувгуудын анхны дериватив болон DN35, DR35, SD56, SDDR зэрэг индексүүдийг анхны деривативыг сонгож тооцоолсон. Ингэхдээ эдгээр дөрвөн индексийг ENVI программаар дараах томъёогоор тооцоолсон [3].

$$DN35 = (D5 - D3)/(D5 + D3) \quad (1)$$

$$DR35 = D5/D3 \quad (2)$$

$$SD56 = D5 + D6 \quad (3)$$

$$SDDR = (D5 + D6)/D4 \quad (4)$$

Энд D3, D4, d5 болон D6 нь сентинел-2 хиймэл дагуулын B3, B4, B5, B6 сувгуудын спектрийн зурвасын анхны дериватив юм. Загварчилсан болон загварчлаагүй сансрын зургийн өгөгдлөөр хортон шавжийн хяналтын нарийвчлалыг харьцуулахын тулд Сентинел-2-ийн загварчилсан болон загварчлаагүй зургийн өгөгдлийн спектрийн индекс (SI) болон спектрийн дериватив шинж чанарыг (SDF) тооцоолсон.

SI болон SDF болон хортон шавжийн үзүүлэлтүүдийн шилмүүсний алдагдлын(LLR) хоорондын хамааралд дүн шинжилгээ хийж, детерменацийн коэффициент R^2 , квадрат дундаж алдаа (RMSE) -г тооцоолсон. Гарсан үр дүнгээр регрессийн загваруудын үнэлгээ хийсэн.

Загварын үнэн зөв байдлыг үнэлэхийн тулд сургалтын болон баталгаажуулалтын детерменацийн коэффициентын дундаж утга (mR^2_{cv}) болон квадрат дундаж алдааны утгыг ($mRMSE_{cv}$) загварын нарийвчлал болгон ашигласан. mR^2_{cv} утга 1-д ойртох тусам, $mRMSE_{cv}$ утга 0-д ойртох тусам загварын нарийвчлал өндөр болно. Дээрх үзүүлэлтүүдийг ашиглан загварын гүйцэтгэлийн индексийг (MPI) өөр өөр загваруудын гүйцэтгэлийн харьцуулалтын индекс болгон тооцов. MPI нь 0-ээс 1-ийн хооронд хэлбэлздэг бөгөөд утга нь 1-д ойртох тусам загварын гүйцэтгэл сайжирна. Дээрх загваруудын гүйцэтгэлийн үнэлгээний холбогдох үзүүлэлтүүдийн тооцооны томъёо нь дараах байдалтай байна [3].

$$mR^2_{cv} = 0.5 \times (R_C^2 + R_V^2) \quad (5)$$

$$mRMSE_{cv} = 0.5 \times (RMSE_C + RMSE_V) \quad (6)$$

$$rR^2_{cv} = |R_C^2 - R_V^2|/mR^2_{cv} \quad (7)$$

$$rRMSE_{cv} = |RMSE_C - RMSE_V|/mRMSE_{cv} \quad (8)$$

$$MPI = k_1 \times mR^2_{cv} + k_2 \times (1 - mRMSE_{cv}) + k_3 \times (1 - rR^2_{cv}) + k_4 \times (1 - rRMSE_{cv})$$

Томъёонд MPI нь загварын гүйцэтгэлийн индекс, k_1, k_2, k_3, k_4 нь $mR^2_{cv}, mRMSE_{cv}, rR^2_{cv}$ болон $rRMSE_{cv}$ -ийн утга бөгөөд тэдгээрийн утга нь $k_1 = 0.33, k_2 = 0.33, k_3 = 0.17, k_4 = 0.17$.

2.2. Мэдээ

Сентинел-2 хиймэл дагуул нь 2015 оноос хойш дэлхийг тойрон тасралтгүй ажиглаж, олон тооны хугацааны цуврал зургуудыг цуглуулж өгөгдлийн сан бүрдүүлсэн. Эдгээр цуврал зургуудад сансрын зургийн мэдээнд өндөр нарийвчлалтай, олон спектрийн дүрслэл бүхий 10 м-ийн дөрвөн суваг, 20 м-ийн зургаан суваг, 60 м-ийн орон зайн нарийвчлалтай гурван суваг нийтдээ 13 сувгийн мэдээг ашиглав. Түүнээс гадна оптик төхөөрөмжийг ашиглагдаараа давуу талтай юм. Энэхүү судалгаанд Европын Сансрын Агентлагийн “Copernicus” нээлттэй мэдээллийн сангаас “Sentinel-2A” хиймэл дагуулын 2018 оны 06 дугаар сарын 26, 2019 оны 06 дугаар сарын 27-ны өдрийн хоёр хугацааны мэдээг Сэлэнгэ аймгийн Баруунбүрэн болон Хэнтий аймгийн Биндэр сумын нутаг дахь судалгааны талбайн хэмжээгээр татаж авч боловсруулсан.

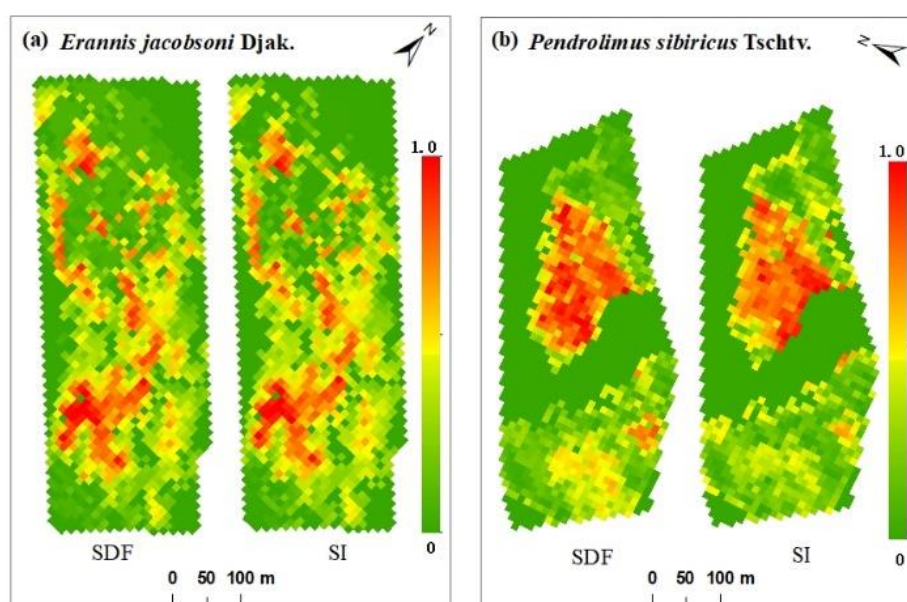
3. ҮР ДҮН

3.1 Шилмүүсний алдагдлыг (LLR) тооцсон үр дүн

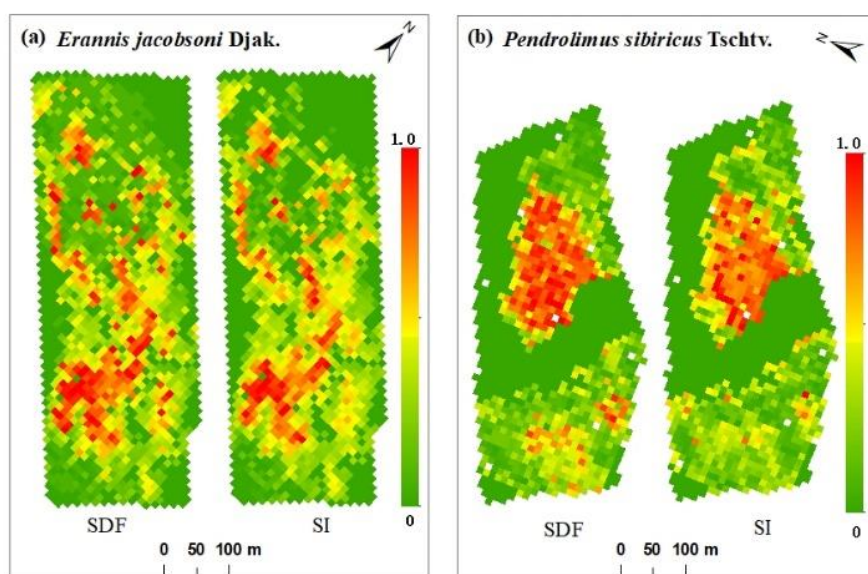
Спектрийн шинж чанар (Si ба SDF) болон шилмүүсний алдагдал(LLR) хоорондын хамаарлын шинжилгээгээр спектрийн шинж чанар бүрийн R^2 детерминацийн коэффициентийг тооцсон. Дараа нь R^2 утгын ялгаатай утгыг ($P < 0.00001$) LLR-тэй ихээхэн холбоотой спектрийн шинж чанарыг шалгах хэмжигдэхүүн болгон ашигласан. Хортон шавжийн хөнөөлд өртсөн модны шилмүүс алдагдлын хэмжээ ихсэх үед хлорофилийн агууламж, усны агууламж буурч, шинэсний шилмүүсний спектрийн утга хариу үйлдэл үзүүлдэг бөгөөд үүний үр дүнд Si, SDF зэрэг спектрийн шинж чанарууд нь янз бүрийн шилмүүс алдагдахад мэдрэмтгий болдог. Тиймээс дээрх сонгосон LLR-ийн Si ба SDF мэдрэмтгий спектрийн шинж чанарууд нь ашиглах боломжтой юм [3].

Зураг 1-т Сентинел-2 хиймэл дагуулын загварчлагдсан өгөгдөлд үндэслэн спектрийн шинж чанарыг ашиглан хортон шавжийн судалгааны хоёр талбайн шинэсэн ойн шилмүүсний алдагдлыг(LLR)-ийг тооцоолсон үр дүнг харуулав.

Якобсоны төөлүүр эрвээхэй, Сибирийн хүр эрвээхэйн хөнөөлд өртсөн ойн LLR-ийн үнэлгээнд SI ба SDF нь хоёулаа адилхан сайн үр дүнг үзүүлж байгааг зургаас харж болно. Сентинел-2 хиймэл дагуулын өгөгдөлд суурилсан шинж чанарууд нь найдвартай бөгөөд LLR үнэлгээний чухал индекс болгон ашиглах боломжтой.



Зураг 1. Хиймэл дагуулын загварчлагдсан өгөгдлийн спектрийн шинж чанарт үндэслэсэн хортон шавжийн хөнөөлийн LLR-ийн тооцоо (a. Якобсоны төөлүүр эрвээхэй; b. Сибирийн хүр эрвээхэй)

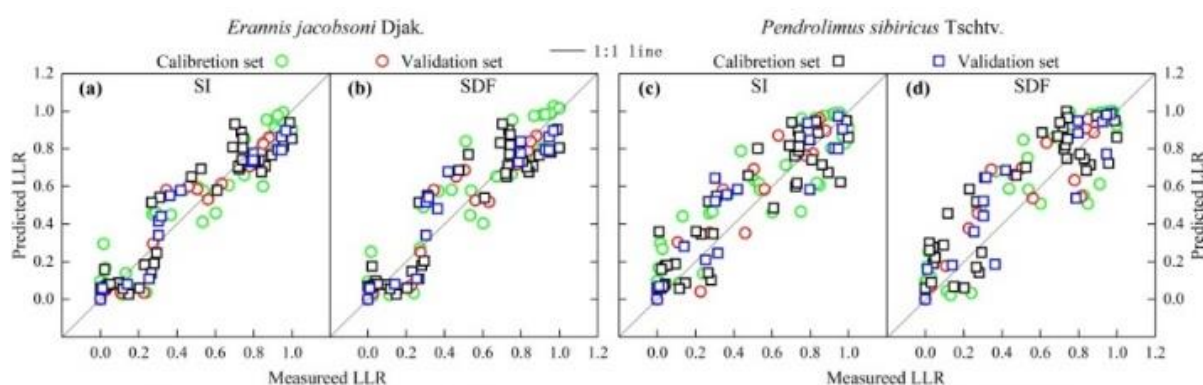


Зураг 2. Загварчлаагүй хиймэл дагуулын өгөгдлийн спектрийн шинж чанарт үндэслэсэн хортон шавжийн хөнөөлийн LLR-ийн үнэлгээ (a. Якобсоны төөлүүр эрвээхэй; b. Сибирийн хүр эрвээхэй)

Зураг 2. загварчлагдаагүй Сентинел-2 хиймэл дагуулын мэдээлэлд суурилсан спектрийн шинж чанарыг ашиглан хортон шавжийн хөнөөлийг судалгааны хоёр талбайн модны LLR-ийг тооцоолсон үр дүнг үзүүлэв. Загварчилсан өгөгдөлтэй харьцуулахад SI болон SDF спектрийн шинж чанарын тооцоолсон LLR утгууд харьцангуй өндөр байна.

3.2 Шилмүүсний алдагдлыг (LLR) тооцсон загваруудын үнэлгээ, үр дүн

Энэхүү судалгаанд Random Forest(RF) ангиллын алгоритмаар өөр төрлийн хортон шавжийн хор хөнөөлийг ялгах загварыг бий болгохын тулд загварчилсан Сентинел-2 хиймэл дагуулын өгөгдөлд үндэслэсэн SI ба SDF-ийг ашигласан бөгөөд дараа нь загварчлаагүй өгөгдөлд суурилсан загвартай харьцуулан, нарийвчлалыг үнэлэв. Ялгах загварыг якобсоны төөлүүр эрвээхэй, сибирийн хүр эрвээхэйн хөнөөлд өртсөн шинэсэн ой бүхий судалгааны талбайд туршиж үзэхэд Сентинел-2 хиймэл дагуулын өгөгдлийн спектрийн шинж чанар нь шилмүүсний өөрчлөлтийг үр дүнтэй ялгаж чаддаг болох нь батлагдсан.



Зураг 3. LLR үнэлгээний загварын 1:1 шугаман хамаарал (a, b Якобсоны төөлүүр эрвээхэй, c, d Сибирийн хүр эрвээхэй)

SI болон SDF ашиглан хортон шавжийн хөнөөлд өртсөн модны LLR үнэлгээний хоёр загварыг Partial Least Squares Regression (PLSR) алгоритмаар бүтээв. Үр дүн нь загварчилсан Сентинел-2 хиймэл дагуулын өгөгдлийн спектрийн шинж чанарт суурилсан LLR үнэлгээний загвар нь илүү сайн үр нөлөө үзүүлж, загварчлаагүй өгөгдлийн спектрийн шинж чанартай харьцуулахад үнэлгээний гүйцэтгэл мэдэгдэхүйц сайжирсан болохыг харуулж байна (Хүснэгт 1).

Хүснэгт 1. LLR үнэлгээний загваруудын гүйцэтгэлийн харьцуулалт

Remote sensing data		Multispectral simulation data based on Sentinel-2A					Multispectral non simulation data based on Sentinel-2A				
Precision index		mR^2_{cv}	$mRMSE_{cv}$	rR^2_{cv}	$rRMSE_{cv}$	MPI	mR^2_{cv}	$mRMSE_{cv}$	rR^2_{cv}	$rRMSE_{cv}$	MPI
EJD	SI	0.8771	0.1121	0.0040	0.1972	0.8882	0.7907	0.2262	0.0253	0.1004	0.8349
	SDF	0.8598	0.1216	0.0305	0.1420	0.8843	0.7226	0.2527	0.0833	0.1031	0.7934
PST	SI	0.8900	0.1121	0.0108	0.0589	0.9149	0.8094	0.1879	0.0859	0.0464	0.8526
	SDF	0.8610	0.1240	0.0564	0.1386	0.8801	0.7423	0.2107	0.0769	0.1485	0.8071

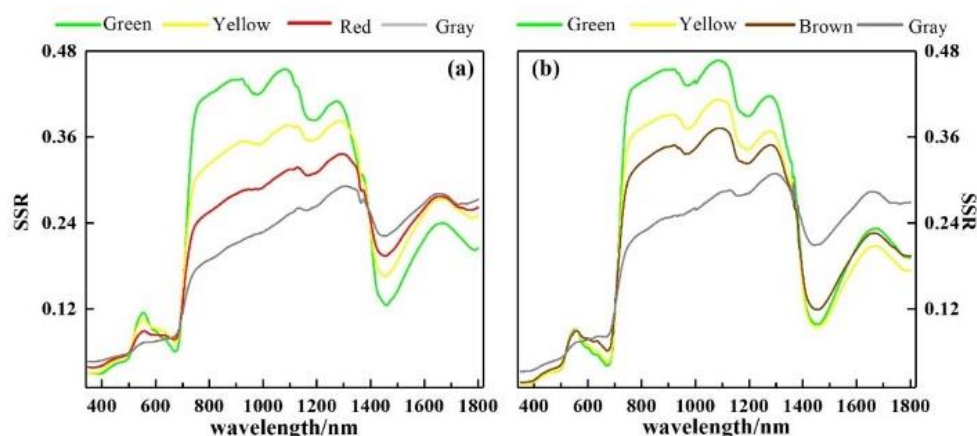
Якобсоны төөлүүр эрвээхэйн хувьд сансрын зургийн өгөгдөлд суурилсан LLR үнэлгээний SI-PLSR загвар нь харьцангуй сайн гүйцэтгэлтэй бөгөөд mR^2_{cv} , $mRMSE_{cv}$, rR^2_{cv} , $rRMSE_{cv}$ болон Загварын гүйцэтгэлийн индекс (MPI) нь 0.8771, 0.1121, 0.0040, 0.1972 ба 0.8882 байна. тус бүр нь загварчлагдаагүй сансрын зургийн өгөгдөлд суурилсан SI-PLSR загвараас 0.0533-аар илүү байна. Сибирийн хүр эрвээхэйн хувьд сансрын зургийн өгөгдөлд суурилсан LLR үнэлгээний SI-PLSR загвар нь мөн адил сайн гүйцэтгэлтэй бөгөөд түүний mR^2_{cv} , $mRMSE_{cv}$, rR^2_{cv} , $rRMSE_{cv}$ болон MPI нь 0.8900, 0.1121, 0.0108, 0.0589 загварчлагдаагүй сансрын зургийн өгөгдөл дээр суурилсан SI-PLSR загвараас 0.0623-аар илүү байна. Хоёр төрлийн хортон шавжийн хөнөөлд өртсөн LLR үнэлгээний үр дүнгийн нарийвчлал өндөр бөгөөд ялгаа нь төдийлөн тодорхой биш буюу ойролцоо гарсан байна.

3.3 LLR үнэлгээний үр дүнгийн харьцуулалт

Загварчилсан Сентинел-2 алсын зайнаас тандан судлах өгөгдлийн спектрийн шинж чанарт суурилсан LLR үнэлгээний загварын гүйцэтгэлийг цаашид тодруулахын тулд загварчлалын багц болон PLSR-ийн баталгаажуулалтын багцын тооцоолсон болон хэмжсэн утгуудын хооронд 1:1 шугаман хамаарлын шинжилгээ хийсэн (Зураг 3). Үр дүн нь загварчлагдсан сансрын зургийн өгөгдлийг ашигладаг SI-PLSR болон SDF-PLSR загваруудын өгөгдлийн цэгүүд нь загварчлалын багц болон баталгаажуулалтын багцад 1:1 шулуун шугамын дагуу тархсан бөгөөд загварчилсан сансрын зургийн өгөгдөл нь загварчлалгүй сансрын зургийн өгөгдлийн загваруудаас хамаагүй нягт, жигд байгааг харуулж байна. SI болон SDF-ийн хувьд SI-PLSR нь хоёр хортон шавжид SDF-PLSR-ээс харьцангуй сайн 1:1 шугаман хамаарлын нөлөө үзүүлсэн нь дээрх загварын гүйцэтгэлийн харьцуулалтын үр дүнтэй нийцэж байна.

4. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Тус судалгааны үр дүнг илүү нарийвчлалтай гаргахын тулд газрын хэмжилт буюу шилмүүсний спектр ойлтыг хэмжиж үр дүнг харьцуулах шаардлагатай. Бид 2016-оноос хойш ӨМБИС-ийн багш судлаачидтай хамтран монгол орны шинэсэн ой тархсан нутгуудад судалгаа хийж хортон шавжийн хөнөөлд нэрвэгдсэн ойд SVC HR-1024 (350 ~ 2500 нм) спектрорадиометр багажийг бага, дунд, их зэрэг янз бүрийн түвшинд гэмтсэн шинэсний шилмүүсний спектрийг хэмжихэд ашигласан. Шинэсэн ой нь хортон шавжийн хөнөөлд нэрвэгдсэн үед түүний шилмүүсний өнгө(FCC) нь тодорхой өөрчлөлтүүдтэй байдаг. Тухайлбал, якобсоны төөлүүр эрвээхийн хөнөөлд өртсөн ойн FCC нь ногоон → шар → улаан → саарал, сибирийн хүр эрвээхийн хөнөөлд өртсөн ойн FCC нь ногоон → шар → хүрэн → саарал гэсэн зүй тогтолтой байдаг (Зураг 4).



Зураг 4. хортонд өртсөн өөр өөр модны шилмүүсний өнгөний SSR (a. Якобсоны төөлүүр, b. Сибирийн хүр)

Хөнөөлд нэрвэгдсэн модны шилмүүсний өөр өөр өнгөний тэгшитгэсэн спектрийн ойлт (SSR)-ын мэдрэмтгий байдлыг цаашид илрүүлэхийн тулд SSR-ийн 4 өөр өнгийн шилмүүсний хэлбэлзлийн F утгыг тооцсон болно. Якобсоны төөлүүр эрвээхийн хувьд $F > F_{0.01(4,61)} = 3.64$ байх үед $P < 0.01$, F нь 3.64-ээс дээш SSR нь өөр төрлийн шилмүүсний өнгөнд харилцан адилгүй нөлөө үзүүлдэг, өөрөөр хэлбэл тэдгээр нь шилмүүсний янз бүрийн өнгөнд мэдрэмтгий байдаг. Эдгээр мэдрэмтгий SSR нь ихэвчлэн 530-550 нм, 600-700 нм, 710-1360 нм, 1416-1600 нм-т тархдаг бөгөөд 710-1360 нм долгионы муж дахь F-ийн хамгийн их утга нь 42.10 байна. Сибирийн хүр эрвээхийн хувьд $F > F_{0.01(4,48)} = 5.50$ байх үед $P < 0.01$, F нь 5.50-аас дээш SSR нь өөр төрлийн шилмүүсний өнгөнд харилцан адилгүй нөлөө үзүүлдэг, өөрөөр хэлбэл тэдгээр нь шилмүүсний янз бүрийн өнгөнд бас мэдрэмтгий байдаг. Эдгээр нь ихэвчлэн 525-565 нм, 646-690 нм, 705-1330 нм, 1420-1520 нм долгионы мужид тархдаг. Үүнээс 705-1330 нм-ийн хоорондох F нь хамгийн дээд хэмжээнд хүрч, хамгийн их утга нь 57.83 байна. Дээрх хоёр зүйлийн хортонд өртсөн ойн SSR нь шилмүүсний янз бүрийн өнгөнд мэдрэмтгий байдаг нь илэрхий байна. SSR ба DSR нь якобсоны төөлүүр, сибирийн хүр зэрэг хортон шавжид идэгдсэн модны шилмүүсний өөрчлөлтөд мэдрэмтгий байдаг бөгөөд тэдгээрийг өөр төрлийн хортон шавжийн үзүүлэлт болгон ашиглаж болохыг харж болно. Үр дүнгээс харахад SSR сибирийн хүр эрвээхийн хөнөөл нь 530-550 нм ба 720-1100 нм-т илүү их ач холбогдолтой байсан бол якобсоны төөлүүр эрвээхийн SSR нь 646-690 нм ба 1420-1520 нм-ийн хооронд харьцангуй ач холбогдолтой байв.

5. ДҮГНЭЛТ

Хортон шавжийн хөнөөлд өртсөн модны шилмүүс алдагдлын хэмжээ ихсэх үед хлорофилийн агууламж, усны агууламж буурч, шинэсний шилмүүсний спектрийн утга хариу үйлдэл үзүүлдэг. Хоёр төрлийн хортон шавжийн хөнөөлд өртсөн шилмүүсний алдагдлын(LLR) үнэлгээний үр дүнгийн нарийвчлал өндөр бөгөөд ялгаа багатай буюу ойролцоо гарсан байна. Загварчилсан Сентинел-2 сансрын зургийн өгөгдлийн спектрийн шинж чанарт суурилсан LLR үнэлгээний загварын гүйцэтгэлийг цаашид тодруулахын тулд загварчлалын багц болон PLSR-ийн баталгаажуулалтын багцын тооцоолсон болон хэмжсэн утгуудын хоорондын 1:1 шугаман хамаарлын шинжилгээ хийсэн.

Үр дүн нь загварчлагдсан сансрын зургийн өгөгдлийг ашигладаг SI-PLSR болон SDF-PLSR загваруудын загварчлалын багц болон баталгаажуулалтын багц дахь өгөгдлийн утгууд нь загварчлаагүй сансрын зургийн өгөгдлийн загвартай харьцуулахад илүү ойр, илүү жигд байгааг харуулж байна. SI болон SDF-ийн хувьд SI-PLSR нь хоёр хортон шавжийн хувьд SDF-PLSR-ээс харьцангуй сайн 1:1 шугаман хамааралтай гэсэн үр дүн үзүүлж байгаа нь дээрх загваруудын гүйцэтгэлийн харьцуулалтын үр дүнтэй нийцэж байна.

ТАЛАРХАЛ

Тус судалгааг хийх нөөц боломжоор хангаж, арга зүйн дэмжлэг үзүүлсэн ӨМБИС-ийн Бао Юу Хай, Хуан Шиао Жун багш нартаа талархаж байгаагаа илэрхийлье. Мөн тус судалгааг гүйцэтгэх боломж олгосон Газарзүй, Геоэкологийн хүрээлэнгийн удирдлагууд, Газарзүйн Мэдээллийн Систем, Зайнаас

Тандан Судлалын салбарын хамт олон, судалгааны багийн гишүүд, орон нутгийн мэргэжилтэн, ойн ангийн хамт олон, байгаль хамгаалагч нартаа талархлаа илэрхийлье.

АШИГЛАСАН НОМ, ХЭВЛЭЛ

- [1] HUANG Xiao-jun, XIE Yao-wen, BAO Yu-hai, BAO Gang, QING Song, BAO Yu-long. 2019. Estimation of Leaf Loss Rate in Larch Infested with *Erannis Jacobsoni* Djak Based on Differential Spectral Continuous Wavelet Coefficient. Spectroscopy and Spectral Analysis. 39 (9) : 2732.
- [2] Xi guilin, Huang Xiaojun, Bao Yu-hai, Bao gang, Ganbat Dashzeveg, Tsagaantsooj Nanzad, Altanchimeg Dorjsuren, Enkhnasan Davaadorj, Mungunkhuyag Ariunaa. 2020. Hyperspectral Discrimination of Different Canopy Colors in *Erannis Jacobsoni* Djak-infested Larch. Optics journal. 40 (9)
- [3] 黄晓君,等.落叶松针叶虫害地面高光谱识别及遥感监测方法研究 [D]. 兰州大学, 2019.
- [4] Guilin Xi., Xiaojun Huang., Yaowen Xie., Bao Gang., Ganbat Dashzeveg., Tsagaantsooj Nanzad., Mungunkhuyag Ariunaa. 2022. “Detection of Larch Forest Stress from Jas’s Larch Inchworm (*Erannis jacobsoni* Djak) Attack Using Hyperspectral Remote Sensing”. remote sensing, 14 (1). Available: <https://doi.org/10.3390/rs14010124>
- [5] А. Мөнгөнхуяг, Д. Ганбат, Хуан Сяо-жун, Бао Юу Хай, Б. Баяртунгалаг, Н. Цагаанцоож. “Спектрийн шинжилгээний аргазүйд тулгуурлан шинэсэн ойн хор хөнөөлийг судлах нь” Хүрэл тогоот-2020 эрдэм шинжилгээний хурал. Улаанбаатар, 2020.
- [6] Г. Бямбахүү, В. Батцэнгэл, Ч. Наранцэцэг, Б. Нямдаваа, О. Мэндбаяр, Б. Сайнбуян, В. Батбаяр1, Фолин Вү. Шилийн Богд орчмын хээрийн түймрийн шаталтын зэрэглэлийг тооцоолох болон нөхөн сэргэх үйл явцын мониторинг судалгаа. Газарзүйн асуудлууд, 22(1).
- [7] Н. Цагаанцоож, 2003. “Якобсоны төөлүүрч эрвээхэйн (*Erannis jacobsoni* Djak) биологи, экологийн онцлог” (Богдхан уулын жишээн дээр) Биологийн Ухааны докторын зэрэг горилсон диссертаци. Улаанбаатар.
- [8] T. Zhang, X. Zhang, H. Liu, X. Pei, 2010. Application of remote sensing technology in monitoring forest diseases and pests. Plant Diseases and Pests 1(3): 57-62.
- [9] S. Adelabu, O. Mutanga, M. Cho, 2012. A review of remote sensing of insect defoliation and its implications for the detection and mapping of *Imbrasia belina* defoliation of Mopane Woodland. African J Plant Sci Biotech 6(1): 1-13.
- [10] J. C. White, M. A. Gómez, N. C. Wulder, Coops (2010). Characterizing temperate forest structural and spectral diversity with Hyperion EO-1 data. Remote Sensing of Environment. 114: 1576-1589 Available: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.012>
- [11] J. C. White, N. C. Coops, T. Hilker, M. A. Wulder, (2007). Use of foliage moisture indices derived from Hyperion satellite imagery to estimate mountain pine beetle red attack. International Journal of Remote Sensing: 28: 2111-2121. Available: <https://doi.org/10.1080/01431160600944028>
- [12] M. A. Denisko, & M. M. Hoffman, (2018). Classification and interaction in random forests. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(8), 1690–1692. Available: <https://doi.org/10.1073/pnas.1800256115>
- [13] G. A. Blackburn Spectral Indices for Estimating Photosynthetic Pigment Concentrations: A Test Using Senescent Tree Leaves. International Journal of Remote Sensing. 2010, 19(4):657-675. Available: <https://doi.org/10.1080/014311698215919>
- [14] G. A. Blackburn and J. G. Ferwerda Retrieval of Chlorophyll Concentration from Leaf Reflectance Spectra Using Wavelet Analysis. Remote Sensing of Environment. 2008, 112:1614-1632. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.005>
- [15] R. Colombo M. Meroni, A. Marchesi, L. Busetto, M. Rossini, C. Giardino. and C. Panigada. Estimation of Leaf and Canopy Water Content in Poplar Plantations by Means of Hyperspectral Indices and Inverse Modeling. Remote Sensing of Environment. 2008, 112:1820-1834. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.005>
- [16] C. Li, X. Zhu, Y. Wei, S. Cao, X. Guo, X. Yu and C. Chang Estimating Apple Tree Canopy Chlorophyll Content Based on Sentinel-2a Remote Sensing Imaging. Scientific REPORTS. 2018, 8:1-10. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21963-0>