

Application of spectral enhancement methods using optical and radar data

Munkh-Erdene Altangerel¹, Enkhmanlai Amarsaikhan^{1,*}, Amarsaikhan
Damdinsuren², Enkhjargal Damdinsuren², Tsogzol Gurjav²

¹Director, Institute of Mathematics and Digital Technology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

²Division of Aerospace Remote Sensing, Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

*Corresponding author email and ORCID: a.enkhmanlai2011@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-6279-9857>

Received: 25 Jun 2025 / Accepted: 16 Oct 2025 / Published online: 19 December 2025

ABSTRACT

Spectral enhancement methods are crucial for identifying objects and features in primary remotely sensed data and accurately determining the differences between them. This study aims to perform spectral enhancement using three techniques: the decorrelation method, Brovey transform, and Gram-Schmidt transformation from the ENVI system on both optical and radar satellite data. The study area includes Khatgal village and a densely forested region in the southern part of Khuvsgul Lake, encompassing various land cover classes such as coniferous forest, settlement, dry plain, mountain soil, and water. In the analysis, four different band combinations of multisource data channels from Sentinel-1 and Sentinel-2 satellites were utilized. The decorrelation method generally proves to be more effective in highlighting objects in optical data compared to radar data. Conversely, the Brovey transform enhances objects differently, depending on the wavelength characteristics of the two sources. Although the brightness of objects in both optical and radar data resulting from the Gram-Schmidt transformation may not be very sharp, the classes are generally well distinguished. Overall, the results of the study indicate that each of the selected methods highlights objects in the image with distinct characteristics, suggesting that the outcome of each method can provide a valuable, unique source of information for thematic interpretation.

Keywords: *Decorrelation method, Brovey transform, Gram-Schmidt transformation, Optical data, Radar data*

Оптикийн ба радарын мэдээнд спектр тодролын аргуудыг ашиглах нь

Мөнх-Эрдэнэ Алтангэрэл¹, Энхманлай Амарсайхан^{1,*}, Амарсайхан

Дамдинсүрэн², Энхжаргал Дамдинсүрэн², Цогзол Гүржав²

¹Захирал, Математик, тоон технологийн хүрээлэн, Шинжлэх Ухааны Академи, Улаанбаатар, Монгол
²Агаар, сансрын зайнаас тандан судлалын салбар, Газарзүй, геоэкологийн хүрээлэн, Шинжлэх Ухааны Академи, Улаанбаатар, Монгол

*Холбоо барих зохиогчийн цахим хаяг: a.enkhmanlai2011@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-6279-9857>

Хүлээн авсан: 2025 оны 06 сарын 25 өдөр / Зөвшөөрөгдсөн: 2025 оны 10 сарын 16 өдөр / Нийтлэгдсэн: 2025 оны 12 сарын 19 өдөр

ХУРААНГУЙ

Зайнаас тандсан анхдагч дүрс өгөгдлүүд дээр дүрслэгдсэн биет, юмсыг тодруулах, биес хоорондын ялгааг нарийвчлан тодорхойлоход спектр тодролын аргууд зайлшгүй шаардлагатай болдог. Энэхүү судалгаа нь оптикийн ба радарын хиймэл дагуулуудын мэдээн дээр ENVI системийн спектр тодролын декорреляцын арга, Бровейн шилжүүлэлт, Грам-Шмидтийн хувиргалт зэрэг алгоритмуудыг ашиглан спектрийн сайжруулалт хийж, үр дүнгүүдийг харьцуулах үндсэн зорилготой. Судалгааны талбайгаар Хөвсгөл нуурын урд хэсгийн Хатгал тосгон болон их ой бүхий газар нутгийг сонгосон бөгөөд газрын бүрхэвчийн хувьд, шилмүүст ой, суурин газар, хуурай сайр, уулын хээр, ус гэсэн ангиллууд зонхилоно. Дүн шинжилгээнд, Sentinel-1 ба Sentinel-2 дагуулуудын олон эх сурвалжийн мэдээний сувгуудын 4 өөр янзын хоршлолыг ашиглав. Декорреляцын арга нь оптикийн мэдээн дээрх биет юмсыг нийтэд нь маш сайн тодруулан радарын мэдээтэй харьцуулахад илүү үр дүнтэй байгаа бол Бровейн шилжүүлэлтийн хувьд, 2 өөр эх сурвалжийн мэдээн дээр тухайн долгионы онцлог шинжээс шалтгаалан биет юмсыг өөр өөрөөр сайжруулж байна. Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн оптикийн болон радарын мэдээн дээрх юмсын тодрол хурц тод биш боловч ангиуд ерөнхийдөө сайн ялгагдаж байна. Судалгааны үр дүнгээс харахад, сонгосон арга тус бүр нь дүрс мэдээн дээрх биет, юмсыг өөр өөрийн онцлогтойгоор тодруулж байсан бөгөөд энэ нь эдгээр үр дүнгүүд, сэдэвчилсэн тайлал хийхэд өөр өөр мэдээллийн эх сурвалж болох боломжтойг харуулж байна.

Түлхүүр үгс: Декорреляцийн арга, Бровейн шилжүүлэлт, Грам-Шмидтийн хувиргалт, Оптикийн мэдээ, Радарын мэдээ

1. ОРШИЛ

Агаар-сансрын янз бүрийн өндрөөс цахилгаан соронзон долгионы өөр өөр мужид хүлээн авсан анхдагч тоон мэдээнд байгаль дээрх биет юмс ижил бусаар илрэх тул тэдгээрийг спектрийн хувьд нь сайжруулснаар эх дэлхийн гадаргуу, түүний төлөв байдал, өөрчлөлттэй холбоотой төрөл бүрийн орон зай, цаг хугацааны дүн

шинжилгээ хийх, улмаар сэдэвчилсэн үр дүнгүүдийг аливаа төлөвлөлт болон шийдвэр гаргах түвшинд ашиглах боломж бүрддэг [1].

Зайнаас тандан судлал (ЗТС)-ын мэдээг боловсруулах дүрсийн тоон шинжилгээний аргуудын дунд спектр тодролын аргууд жинтэй байр суурь эзэлдэг ба мэдээн дээр дүрслэгдсэн

байгалийн болон хүний үйл ажиллагаагаар бий болсон биет юмсын спектр тодролыг олон төрлийн аргаар сайжруулдаг. Ийм төрлийн аргууд 1972 онд АНУ эх дэлхийн тухайн газар нутгийн тоон мэдээг 16 хоног тутам хүлээн авдаг анхны Landsat-1 дагуулыг хөөргөсөн цаг үеэс эрчимтэй хөгжиж эхэлсэн бөгөөд практикт эрчимтэй ашиглагдаж ирсэн анхны аргуудын тоонд гистограммын сунгалт ба тэгшитгэл зүй ёсоор багтана [2].

Өнгөрсөн зууны сүүлч үеэс, спектр, орон зайн өндөр шийдтэй шинэ үеийн оптикийн ба радарын хиймэл дагуулууд бий болсноор тандан судлалын хөгжил шинэ шатанд гарсан. Ингэснээр, цөөхөн хэдэн функцүүдээр хязгаарлагддаг дүрс мэдээ боловсруулах алгоритмууд улам төгөлдөршин, хүлээн авч буй мэдээний үзүүлэлтүүд сайжирч, илүү ахисан түвшний дүн шинжилгээний аргууд хөгжиж, улмаар эрдэмтэд, судлаачид, хэрэглэгчид, шийдвэр гаргагч нарт сэдэвчилсэн судалгаа, түүний үр дүнг хэрхэн ашиглахтай холбоотой олон боломжийг олгож эхэлсэн юм [3]. Зайнаас тандсан мэдээг спектрийн хувьд нь сайжруулах анхны судалгаануудын нэгийг Harris [4] 1980 онд хийсэн байна.

Тэрээр дүрс мэдээг сайжруулахад экспертийн мэдлэгийг хэрхэн ашиглах талаар өөрийн дүгнэлтийг гаргажээ. 1985 онд Rakshit ба Swaminathan нар [5] Landsat дагуулын мэдээнд сувгуудын сунгалт болон сувгийн харьцаан дээр суурилсан хэд хэдэн спектр тодролын аргыг ашиглан сайжруулалт хийж, уг аргууд ашигт малтмалын ордын судалгаанд хэрхэн ашиглагдаж болох талаар санал дэвшүүлжээ. 1992 онд Krishnamurthy нар [6] ЗТС-ын мэдээнд сувгуудын хоршол, шүүлтүүрүүд, гол компонентын шинжилгээ (ГКШ) зэрэг аргуудыг ашиглан гүний устай холбоотой байгалийн тогтцыг судлах судалгааг хийсэн нь ихээхэн үр дүнтэй байжээ. Тэр

2. СУДАЛГААНЫ ТАЛБАЙ, АШИГЛАСАН МЭДЭЭ

Судалгааны загвар талбай нь Хөвсгөл нуурын урд хэсгийн Хатгал тосгон болон их ой бүхий баруунаас зүүн тийш 30 гаруй км, хойноос урагшаа 20 гаруй км газар нутгийг хамрах бөгөөд газрын бүрхэвчийн хувьд, Монгол орны ойн талбайн дийлэнх хэсгийг эзэлдэг шилмүүст ой, Хөвсгөл нуур, түүнээс урсан гарах Эгийн гол, суурин газар, хуурай сайр, уулын хээр гэсэн ангиуд зонхилно.

Судалгаанд 2022 оны 9-р сарын 8-ны өдөр Sentinel-2 дагуулаас хүлээн авсан 10 м-ийн нарийвчлалтай оптикийн эх мэдээний 6 суваг (B2,

цаг үеэс хойш дүрс мэдээг спектрийн хувьд нь сайжруулсан маш олон төрлийн судалгаа хийгдэж, олон аргууд бий болсон боловч практикт сувгуудын харьцаа, ортогональчлал, ГКШ, гистограммын шинжилгээнд суурилсан аргууд түгээмэл ашиглагдаж байна.

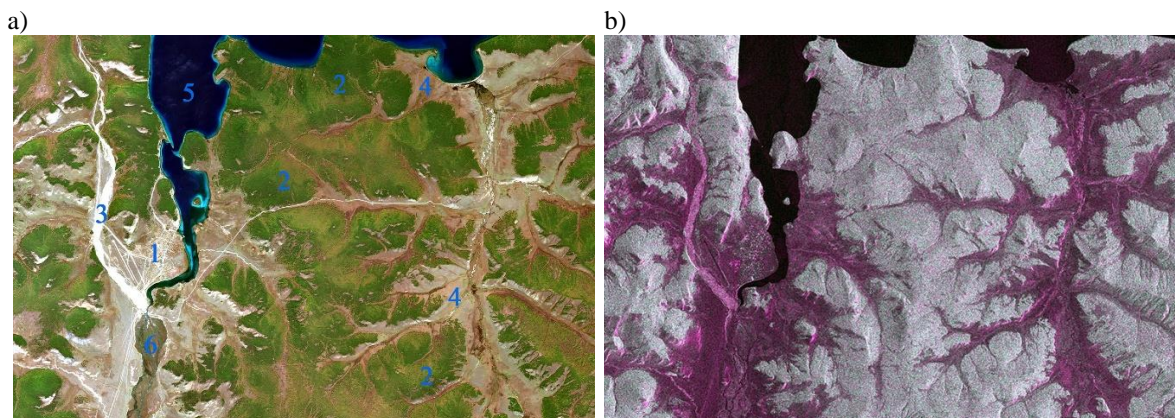
Манай улсын хэмжээнд дүрсийн спектр тодролтой холбоотой анхны судалгааг М.Ганзориг нар [7] 1990 онд хийжээ. Уг судалгаанд, Сэлэнгэ аймгийн Цагаантолгойн нутгийн агаар, сансрын мэдээнд олон төрлийн аргууд ашиглан, спектрийн сайжруулалт хийсэн байна. Дараачийн үеийн дорвитой судалгаануудыг Д.Амарсайхан нар [8], [9] хийсэн бөгөөд Монгол орны зарим нутгийн Landsat TM дагуулын мэдээний олон сувгуудад өөр өөр спектр тодролын аргуудыг ашиглан сайжруулалт хийж, харьцуулсан дүн шинжилгээ хийсэн байна.

Сүүлийн үеийн онцлох судалгааны тоонд, 2022 онд Д.Амарсайхан нар [10]-ын хийсэн судалгаа багтана. Тус судалгаанд Оюутолгойн орд, Ханбогдын районуыг хамарсан нутгийн оптикийн ба радарын нийлмэл мэдээг дүрсийг сайжруулах аргуудаар сайжруулан, сонирхолтой үр дүнг гарган авчээ.

Энэхүү судалгаа нь олон эх сурвалжийн мэдээнд өөр өөр аргууд ашиглан спектрийн сайжруулалт хийж, үр дүнгүүдийг харьцуулан судлах зорилготой. Энэ зорилгын хүрээнд дараах зорилтуудыг дэвшүүлсэн: а) Хөвсгөл нуурын өмнөд хэсгийг хамарсан Sentinel-1 ба Sentinel-2 дагуулуудын мэдээг орон зайн хувьд нь ижил 10 м-ийн шийдтэй болгоно; б) нийлмэл мэдээнд радиометрийн сайжруулалт хийнэ; в) декорреляцийн арга, Бровейн шилжүүлэлт, Грам-Шмидтийн хувиргалт зэрэг аргуудыг ашиглан, харьцуулсан дүн шинжилгээ хийнэ.

B3, B4, B8a, B11, B12), 2022 оны 8-р сарын 23-ны өдөр Sentinel-1B дагуулаас хүлээн авсан C сувгийн (5.55 см) хос туйлшралын 10 м орон зайн шийдтэй, Level 1 GRD бүтээгдэхүүний радарын мэдээг тус тус ашигласан болно.

Sentinel-2A дагуулын эх өгөгдлүүд нь өөр өөр орон зайн шийдтэй тул тэдгээрийг радарын мэдээтэй ижил нарийвчлалтай болгох үүднээс геометрийн засал хийж 10 м-ийн шийдтэй болгов. **Зураг 1а, б**-д судалгааны талбайн Sentinel-2A, Sentinel-1B дагуулын мэдээнүүд болон газрын бүрхэвчийн ангиудын тархалтыг харуулав.



Зураг 1. Судалгааны талбайн зураг: (a) Sentinel-2A дагуулын мэдээ ($Y=B4$, $H=B3$, $X=B2$) (1- Хатгал тосгон, 2-ой, 3-хуурай сайр, 4-хөрс, 5-Хөвсгөл нуур, 6- Эгийн гол) (б) Sentinel-1B дагуулын мэдээ ($Y=VV$, $H=VH$, $X=(VV+VH)/2$).

3. СУДАЛГААНЫ АРГАЗҮЙ

Энэхүү судалгаанд, агаар-сансрын өгөгдлийн анхдагч сайжруулалтын аргууд болох геометрийн засал, радиометрийн сайжруулалт, 3×3 хэмжээтэй Фрост толбо арилгах шүүлтүүр зэргийг ашигласны дараа дүрс сайжруулалтын декорреляцийн арга, Бровейн (Brovey) шилжүүлэлт, Грам-Шмидтийн (Gram-Schmidt) хувиргалт зэрэг аргуудыг ашигласан болно.

Декорреляцийн арга нь өндөр корреляцийн хамаарал бүхий олон сувгийн мэдээний өөр хоорондын хамаарлыг багасгах буюу арилгах замаар дүрс мэдээнд дүрслэгдсэн объектуудын спектр тодролыг сайжруулна. Тус арга нь гол компонентын шинжилгээтэй ижил төстэй зарчим дээр тулгуурладаг [11]. Дүрсийн тоон боловсруулалтад декорреляцийн арга нь Карунен-Лоэв (Karhunen Loeve)-ийн хувиргалтыг ашиглах бөгөөд уг хувиргалт нь ковариацийн матрицыг диагональчлан, хамгийн их болон бага утгууд бүхий хувийн утгуудыг тодорхойлно [12]. Зайнаас тандсан олон бүсчлэлийн мэдээний үзэгдэх гэрлийн сувгууд өөр хоорондоо өндөр корреляцийн хамааралтай байдаг тул энэхүү аргыг ашиглавал зохимжтой. Үүнээс гадна, нэл улаан туяаны сувгуудаас бүрдсэн болон ижил долгионы урттай радарын өгөгдлийг ашиглан үүсгэсэн хуурмаг дүрс зурагт ч ашиглаж болно.

Бровейн шилжүүлэлт нь дунд зэргийн нарийвчлалтай олон сувгийн мэдээ болон нарийвчлал өндөртэй панхроматик өгөгдлийг ашиглан янз бүрийн биетийг спектр, орон зайн

хувьд нь илүү тодруулж өгдөг [13]. Оптикийн тандан судлалд олон сувгийн мэдээний спектрийн шийдийг, панхроматик өгөгдлийн орон зайн нарийвчлалыг ашигладаг бол мөн радарын мэдээтэй нийлүүлэн янз бүрийн аргаар хоршуулан хэрэглэж болно. Богино долгионы мэдээтэй хоршуулахын тулд, радарын мэдээнд шүүлтүүр ашиглан толбыг багасгахаас гадна, гадаргын засал хийх шаардлагатай байдаг. Бровейн шилжүүлэлтэд, олон сувгийн мэдээг векторын нормыг ашиглан нормчилсны дараа орон зайн өндөр шийдтэй мэдээгээр үржүүлдэг [14]. Үүний дараа, анхны шилжүүлэлтэд орсон эх өгөгдлүүдийн спектр, орон зайн шинж чанарыг агуулсан сайжруулсан дүрс зураг үүсдэг.

Грам-Шмидтийн хувиргалт нь олон хэмжээт эх өгөгдлийг ортогональчлах зарчим дээр тулгуурлах бөгөөд математикт дурын сууриас ортогональ суурь гаргаж авах процессыг Грам-Шмидтийн ортогональчлал гэдэг [15]. Зайнаас тандан судлалд Грам-Шмидтийн арга нь олон хэмжээт дүрс өгөгдлийг өөр хоорондоо шугаман хамаарал бүхий ортогональ өгөгдлийн олонлог болгон хувиргана. Үүний тулд, эхлээд тодорхой нарийвчлал бүхий хар, цагаан буюу панхроматик дүрсийг анхдагч олон сувгийн өгөгдлийн жигнэсэн дунджийг ашиглан бий болгоно [16]. Дараа нь уг мэдээг ашиглан олон сувгийн мэдээг ортогональчлах ажиллагаа явагдана. Өөрөөр хэлбэл, нийт өгөгдлийн хувьд суваг хоорондын корреляцийн хамаарал багасгах бөгөөд хувиргалтын үр дүнд орон зайн болон спектрийн хувьд сайжирсан дүрс зураг бий болно.

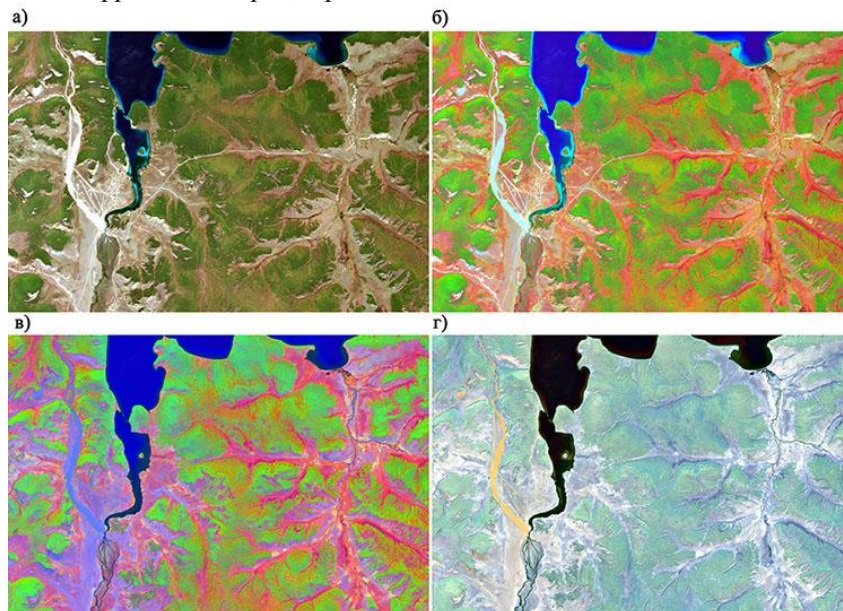
3. ҮР ДҮН, ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Судалгаанд ENVI 5.6 дүрс боловсруулалтын программыг ашигласан бөгөөд Sentinel-1, 2 дагуулын дараах сувгуудын хоршлолыг ашигласан болно. Үүнд:

1. Sentinel-2 дагуулын B2, B3, B4-р сувгууд.
2. Sentinel-2 дагуулын B3, B4, B8a-р сувгууд.
3. Sentinel-2 дагуулын B8a, B11, B12-р сувгууд.
4. Sentinel-1 дагуулын VV, VH, (VV+VH)/2 сувгууд.

3.1. B2, B3, B4-р сувгуудын үр дүн

Sentinel-2A дагуулын B2, B3, B4-р сувгуудын мэдээ нь цахилгаан соронзон долгионы үзэгдэх хөх, ногоон, улаан гэрлийн мужуудад хамаарах бөгөөд эдгээр сувгуудын тоон өгөгдлийг улаан, ногоон, хөх өнгөөр кодлон, дүрс үүсгэснээр байгалийн өнгөөрөө ялгаран харагдах өнгөт зураг үүснэ. **Зураг 2**-д декорреляцийн арга, Бровейн



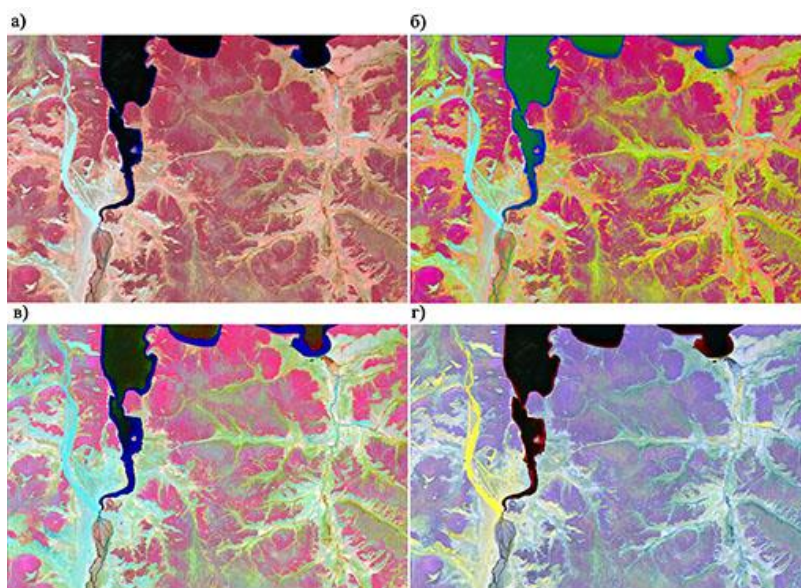
Зураг 2. B2, B3, B4-р сувгуудын үр дүн: (а) эх зураг, (б) декорреляцын аргаар сайжруулсан зураг, (в) Бровейн шилжүүлэлтийн дүнд үүссэн зураг (г) Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн зураг.

3.2. B3, B4, B8a-р сувгуудын үр дүн

Sentinel-2A дагуулын B3, B4, B8a-р сувгуудын мэдээ нь цахилгаан соронзон долгионы үзэгдэх ногоон, улаан, ойрын нэл улаан туяаны мужуудад хамаарах бөгөөд эдгээр сувгуудын тоон өгөгдлийг улаан, ногоон, хөх өнгөөр кодлон, дүрс үүсгэснээр байгалийн өнгөтэй харьцуулахад хуурмаг өнгөт зураг үүснэ. **Зураг 3**-д сонгосон аргуудыг ашиглан гарсан өнгөт зургуудыг харуулав. Зургаас харахад, эх зурагтайгаа харьцуулахад декорреляцийн аргаар сайжруулсан зураг дээрх

шилжүүлэлт, Грам-Шмидтийн хувиргалт зэрэг аргуудыг ашиглан гарсан өнгөт зургуудыг харуулав. Зургаас харахад, эх зурагтайгаа харьцуулахад декорреляцийн аргаар сайжруулсан зураг дээрх бүх юмсын тодрол маш хурцаар тодорчээ. Ялангуяа, хуурай сайрын хувьд ижил төстэй өнгөтэй байсан суурин газар болон хөрснөөс сайтар ялгагдаж байна. Бровейн шилжүүлэлтийн дүнд үүссэн зураг дээрх бүх юмсын тодрол сайн байгаа боловч, хэтэрхий хурц тодролтой байна. Хуурай сайрын хувьд тодрол нь сайн байгаа хэдий ч, доод хэсгийн хөрснөөс төдийлөн ялгагдахгүй байна. Харин Хөвсгөл нуураас эх аван урсах Эгийн гол тод ялгагдан харагдаж байна. Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн зураг дээрх бүх юмсын тодрол нийтдээ бүрсгэр байгаа хэдий ч, тус зурган дээр Эгийн гол, хуурай сайр, хөрс зэрэг ангиуд маш сайн ялгаран харагдаж байна.

юмс маш сайн тодорсон хэдий ч, хөрс олон янзаар тодорсноос үүдэн зарим талаараа ойтой холилдсон мэт харагдаж байна. Бровейн шилжүүлэлтийн дүнд үүссэн зураг дээрх бүх юмсын тодрол декорреляцийн аргаар сайжруулсан зургийн тодролын хувилбар мэт харагдаж байна. Энэ зураг дээр бусад үр дүнгүүдтэй харьцуулахад, Эгийн гол тод ялгаран харагдаж байна. Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн зураг дээрх бүх юмсын тодрол нийтдээ хурц тод биш боловч, ангиуд сайн ялгагдаж байна. Ялангуяа, бусад зургуудтай харьцуулахад ой, хөрс зэрэг ангиуд өөр хоорондоо сайн ялгаран харагдаж байна.

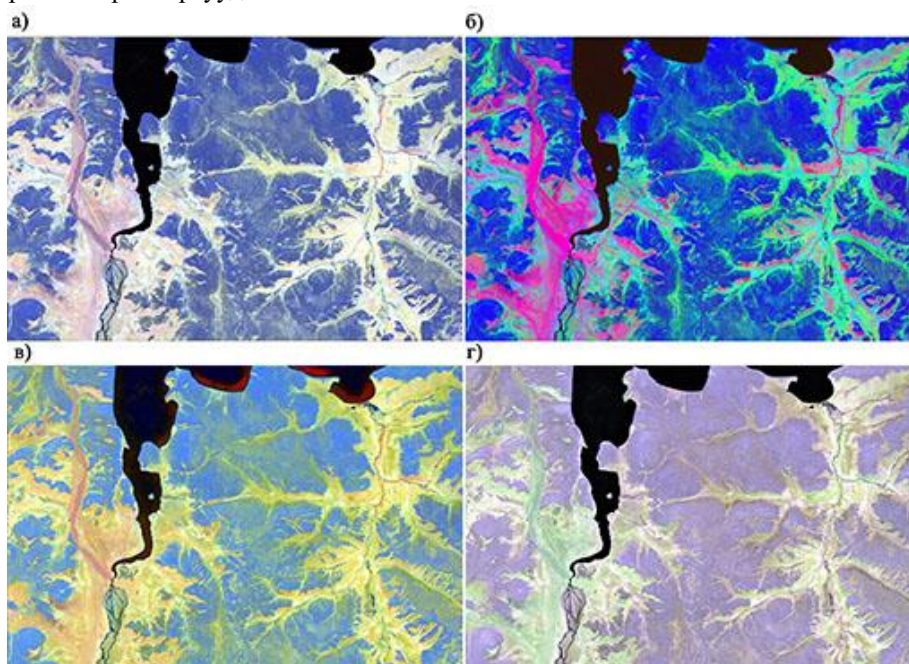


Зураг 3. В3, В4, В8а -р сувгуудын үр дүн: (а) эх зураг, (б) декорреляцийн аргаар сайжруулсан зураг, (в) Бровейн шилжүүлэлтийн дүнд үүссэн зураг (г) Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн зураг.

3.3. В8а, В11, В12-р сувгуудын үр дүн

Sentinel-2A дагуулын В8а, В11, В12-р сувгуудын мэдээ нь цахилгаан соронзон долгионы ойрын нэл улаан болон богино долгионы нэл улаан туяаны мужуудад хамаарах бөгөөд эдгээр сувгуудын тоон өгөгдлийг улаан, ногоон, хөх өнгөөр кодлон, дүрс үүсгэснээр нэл улаан туяаны хуурмаг өнгөт зураг үүснэ. **Зураг 4**-д декорреляцийн арга, Бровейн шилжүүлэлт, Грам-Шмидтийн хувиргалт зэрэг аргуудыг ашиглан

гарсан өнгөт зургуудыг харуулав. Зургаас харахад, декорреляцийн аргаар сайжруулсан зураг дээрх юмс маш сайн тодорсон байна. Энэ зураг дээр хуурай сайр Эгийн голын хөндийн хөрстэй зарим хэсэгтээ ижилдүү өнгөтэй харагдаж байна. Бровейн шилжүүлэлтийн болон Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн зургууд дээрх бүх юмс нийтдээ хурц тодролгүй боловч, ангиуд сайн ялгагдаж байна. Ялангуяа, декорреляцийн аргаар сайжруулсан зурагтай харьцуулахад, Эгийн гол болон хуурай сайр сайн ялгаран харагдаж байна.



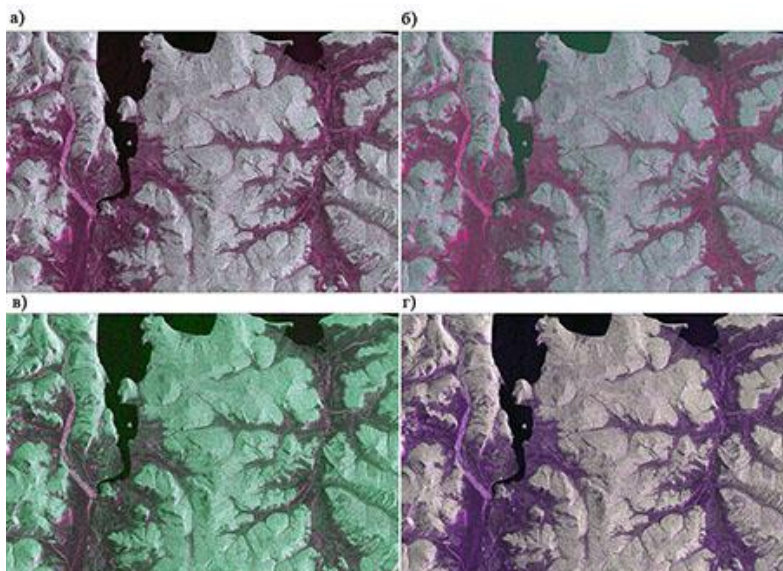
Зураг 4. В8а, В11, В12-р сувгуудын үр дүн: (а) эх зураг, (б) декорреляцын аргаар сайжруулсан зураг, (в) Бровейн шилжүүлэлтийн дүнд үүссэн зураг (г) Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн зураг.

3.4. VV, VH, (VV+VH)/2 сувгуудын үр дүн

Sentinel-1B дагуул нь 5.55 см урттай долгион ашиглан хос түйлшралаар мэдээ хүлээн авах бөгөөд VV, VH, (VV+VH)/2 сувгуудын тоон өгөгдлийг улаан, ногоон, хөх өнгөөр кодлон, дүрс үүсгэснээр радарын хуурмаг өнгөт зураг үүснэ. Идэвхтэй тандан судлалын тоон мэдээ хүлээн авах зарчим нь оптикийн ЗТС-тай харьцуулахад өөр бөгөөд радарын мэдээн дээр дүрслэгдсэн биет, юмсын тайллыг хийхэд сарнилын механизмыг ашигладаг. Радарын С-сувгийн мэдээний хувьд, ойд эзлэхүүнт сарнил үүсэж, цайвардуу өнгөөр илэрхийлэгдэх бол усан дээр шулуун сарнил үүсэж, ус хардуу өнгөөр тодорно. Харин бусад биесийн хувьд, дундын сарнил үүсэж, бараанаас саарал руу шилжсэн завсрын өнгөөр илэрхийлэгдэх магадлалтай. **Зураг 5**-д сонгосон

аргуудыг ашиглан гарсан өнгөт зургуудыг харуулав. Зургаас харахад, декорреляцийн аргаар сайжруулсан зураг дээрх юмсын тодролд эх зурагтайгаа харьцуулахад, ой бага зэрэг ногоон өнгөтэй болсныг эс тооцвол төдийлөн их өөрчлөлт гараагүй байна. Бровейн шилжүүлэлтийн дүнд үүссэн зураг дээрх бүх юмсын тодрол декорреляцийн аргаар сайжруулсан зургаас илүү байна. Энэ зураг дээр ой ногоон өнгөөр тод ялгаран харагдаж байхаас гадна, хуурай сайр хөрснөөс илт ялгаран харагдаж байна.

Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн зураг дээрх бүх юмсын тодрол нийтдээ сайн ялгагдаж байна. Гэхдээ ой цайвар саарал өнгөөр, хөрс, сайр зэрэг ангиуд уламжлалт биш өнгөөр илэрхийлэгдсэн нь, тайлал хийхэд хүндрэл учруулах магадлалтай байна.



Зураг 5. VV, VH, (VV+VH)/2 сувгуудын үр дүн: (а) эх зураг, (б) декорреляцийн аргаар сайжруулсан зураг, (в) Бровейн шилжүүлэлтийн дүнд үүссэн зураг (г) Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн зураг

Декорреляцийн арга нь оптикийн мэдээн дээрх биет, юмсыг нийтэд нь маш тод, ялгарал сайтайгаар дүрслэн харуулж байна. Өөрөөр хэлбэл, тухайн зурган дээрх өнгө, спектрийн ялгарал нэмэгдэж, газар дээрх объектууд илүү тодорхой танигдах нөхцөл бүрдэж байна. Гэсэн хэдий ч, уг аргыг радарын мэдээнд хэрэглэхэд төдийлөн их өөрчлөлт, ахиц ажиглагдахгүй байх бөгөөд энэ нь радарын долгионы онцлогоос шалтгаалан тухайн аргын үр нөлөө хязгаарлагдмал байгааг харуулж байгаа юм.

Бровейн шилжүүлэлтийн хувьд, оптикийн мэдээнд янз бүрийн өөрчлөлтийг харуулж, тухайн долгионы спектрийн онцлогоос хамаарч биетүүдийг харилцан адилгүй тодруулж байна. Энэ нь оптикийн мэдээний сул корреляцийн хамаарал бүхий сувгуудыг ашигласан тохиолдолд илүү их ажиглагдах боломжтой. Харин радарын мэдээнд Бровейн шилжүүлэлт нь илүү үр дүнтэй байх бөгөөд биетүүдийн ялгарал спектр тодролын хувьд сайжирсан байгаа нь харагдаж байна.

Грам-Шмидтийн хувиргалтын үр дүн дээр оптикийн болон радарын аль аль мэдээн дээр дүрслэгдсэн биетүүдийн тодрол харьцангуй хурц тод биш байна. Гэсэн хэдий ч, энэхүү хувиргалт нь өгөгдлийг илүү зохион байгуулалттай болгож, анги хоорондын ялгарал зохистой хэмжээнд хадгалагдан, ангиллын түвшинд объектууд ерөнхийдөө сайн ялгагдах боломжийг бий болгож байна.

4. ДҮГНЭЛТ

Судалгааны хүрээнд оптикийн ба радарын хиймэл дагуулуудын мэдээнд ENVI системийн спектр тодролын алгоритмуудыг ашиглан спектрийн сайжруулалт хийж, үр дүнгүүдийг харьцуулан судлахыг зорьсон болно. Дүн шинжилгээнд Sentinel-2A дагуулын олон бүсчлэлийн мэдээний 5 суваг, Sentinel-1B дагуулын C-сүвгийн хос туйлшралаар хүлээн авсан радарын өгөгдлийг тус тус сонгон,

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Д. Амарсайхан, Орчин үеийн газарзүйн мэдээллийн систем, тандан судлалын зарчмууд. 32.8 хэв. хуудас, Улаанбаатар, 2019.
- [2] A. Cohen, D. Amarsaikhan, and de Leeuw, "Application of GER-II data for geomorphological study," in *Proc. 13th Asian Conf. Remote Sensing*, Ulaanbaatar, Mongolia, pp. E-5-1–E-5-6, 1992.
- [3] P. M. Mather and B. Koh, *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*, 4th ed., Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 2011.
- [4] R. Harris, "Spectral and spatial image processing for remote sensing," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 1, no. 4, pp. 361–375, 1980, <https://doi.org/10.1080/01431168008948248>.
- [5] A. M. Rakshit and V. L. Swaminathan, "Application of digitally processed and enhanced LANDSAT imagery for geological mapping and mineral targeting in the Singhbhum Precambrian mineralized belt, Bihar-Orissa," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 6, nos. 3–4, pp. 457–471, 1985, <https://doi.org/10.1080/01431168508948468>.
- [6] J. Krishnamurthy, P. Manavalan, and V. Saivasan, "Application of digital enhancement techniques for groundwater exploration in a hard-rock terrain," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 13,

сүвгуудын 4 ялгаатай хоршлолыг ашиглав. Декорреляцийн арга нь оптикийн мэдээн дээрх биет юмсыг нийтэд нь маш сайн тодруулж байгаа бол радарын мэдээний хувьд төдийлөн их өөрчлөлт гарахгүй байна.

Бровейн шилжүүлэлт нь оптикийн мэдээн дээрх биет юмсыг тухайн долгионы онцлогоос шалтгаалан нийтэд нь өөр өөрөөр тодруулж байгаа бол радарын мэдээний хувьд декорреляцийн аргаас илүү үр дүнг өгч байна. Харин Грам-Шмидтийн хувиргалтын дүнд үүссэн оптикийн болон радарын мэдээн дээрх юмсын тодрол хурц тод биш боловч, ангиуд ерөнхийдөө сайн ялгагдаж байна.

Судалгааны үр дүнгээс харахад, сонгосон арга тус бүр нь дүрс мэдээн дээрх биет юмсыг өөр өөрийн онцлогтойгоор тодруулан, спектрийн хувьд нь сайжруулж байх бөгөөд энэ нь сэдэвчилсэн тайлал хийхэд ихээхэн ач холбогдолтой мэдээллийн эх сурвалж болох юм.

- no. 15, pp. 2925–2942, 1992, <https://doi.org/10.1080/01431169208904091>.
- [7] D. Amarsaikhan and B. Enkhtuvshin, "An application of remote sensing and GIS technique in Mongolia," in *Proc. European 'International Space Year' Symp.*, Munich, Germany, pp. 387–390, 1992.
- [8] D. Amarsaikhan, M. Ganzorig, and W. Nieuwenhuis, "A modification of the priori probabilities in the maximum likelihood classification," in *Proc. 15th Asian Conf. Remote Sensing*, Bangalore, India, pp. I-7-1–I-7-4, 1992.
- [9] Д. Амарсайхан, М. Ганзориг, and О. Цолмонгэрэл, "Спектр тодролыг сайжруулах аргуудыг харьцуулсан дүнгээс," *ШУА-ийн Информатикийн Хүрээлэнгийн Эрдэм Шинжилгээний Бүтээл*, pp. 35–39, 1997.
- [10] D. Amarsaikhan, S. Jargalan, D. Khashbat, and others, "Investigation of geo-structure of the Khan Bogd massive using optical and microwave RS," in *eProc. Asian Conf. Remote Sensing*, Ulaanbaatar, Mongolia, 2022.
- [11] J. Harman, "Using decorrelation stretch to enhance rock art images," *Amer. Rock Art Res. Assoc. Annu. Meeting*, https://www.dstretch.com/AlgorithmDescripti_on.pdf.
- [12] P. Vonghirandecha, S. Kansomkeat, and P. Bhurayanontachai et al., "Decorrelation stretch for enhancing colour fundus photographs affected by cataracts," *Comput. Methods*

- Biomech. Biomed. Eng.: Imaging & Visualization*, vol. 11, no. 7, 2022. <https://doi.org/10.1080/21681163.2023.2274948>.
- [13] J. Dong, D. Zhuang, Y. Huang, and J. Fu, "Survey of multispectral image fusion techniques in remote sensing applications," 2011. <https://doi.org/10.5772/10548>.
- [14] D. Amarsaikhan and N. Ganchuluun, "Fusion and classification of multisource images for update of forest GIS," in *Image Fusion: Principles, Technology and Applications*, New York, USA: Nova Science Publishers, pp. 83–121, 2015.
- [15] B. Yan and Y. Kong, "A fusion method of SAR image and optical image based on NSCT and Gram-Schmidt transform," in *Proc. IGARSS 2020 – IEEE Int. Geosci. and Remote Sensing Symp.*, Waikoloa, HI, USA, pp. 2332–2335, 2020. <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323158>.
- [16] S. Singh and K. C. Tiwari, "Exploring the optimal combination of image fusion and classification techniques," *Remote Sens. Appl.: Soc. Environ.*, art. no. 100642, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100642>.

