



NATIONAL UNIVERSITY OF MONGOLIA  
SCHOOL OF ART AND SCIENCES  
DEPARTMENT OF GEOGRAPHY

## *Geographical Issues*

---

## *Газарзүйн Асуудлууд*

*Volume 26 (01)*

*ISSN: 2312-8534*

*2026*

*Ulaanbaatar*

# Temporal and spatial variation of gross primary productivity and its response to extreme climate in Mongolia

©Ai Lan <sup>1</sup>, Sainbuyan Bayarsaikhan <sup>1,2\*</sup>, Vandansambuu Battengel <sup>1,2,3</sup>, Urtnasan Mandakh <sup>4</sup>, Nyamaa Tegshjargal <sup>5</sup>, Mendbayar Otgonbayar <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geography, School of Art and Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 210646, Mongolia

<sup>2</sup> Research Laboratory of Geo-Informatics (GEO-iLAB), Graduate school, National University of Mongolia, 210646, Mongolia

<sup>3</sup> Urban and Regional development, Research institute, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 14200, Mongolia

<sup>4</sup> Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar 15170, Mongolia

<sup>5</sup> School of Agroecology, Mongolian University of Life Sciences, Ulaanbaatar 15170, Mongolia

\*Corresponding author: [sainbuyan.b@num.edu.mn](mailto:sainbuyan.b@num.edu.mn)

Received: 2025.09.19

Revised: 2025.11.01

Accepted: 2025.11.04

## Abstract

Mongolia has extremely fragile ecosystems and rich vegetation resources in arid and semi-arid zones. It is highly affected by extreme climatic events and is important in the global carbon cycle. In global warming, it is important to study its vegetation changes for ecological security. In this paper, based on the gross primary productivity (GPP) data with daily maximum temperature, daily minimum temperature and daily precipitation data of Mongolia from 2000 to 2023, the characteristics of spatial and temporal changes in GPP and its response to climate extremes were analyzed by using Sen Slope + Mann-Kendall trend analysis, MK mutation test, Pearson's correlation analysis method, and structural equation modeling (SEM). The main findings of the study are as follows: (1) GPP shows an overall increasing trend, especially in the northern Mongolia, with 61% of the study area experiencing significant growth. (2) Extreme temperature indices (SU, TNx, TNn) and precipitation index R20 are increasing at most stations, while R95P and SDII are declining. (3) Extreme precipitation indices generally support GPP, though they suppress it in Western Mongolia. R20 is identified as the primary driver of vegetation growth. (4) TNx and SU inhibit GPP, except in North Mongolia, where warmer summers enhance productivity. R20 and R95P have opposing effects on GPP, highlighting the dual role of precipitation type and intensity.

**Keywords:** GPP, extreme climate events, extreme climate indices, Mongolia, Structural Equation Modeling (SEM)

## Монгол орны ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүний орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлт, эрс тэс уур амьсгалын үзүүлэх нөлөө

©Аялан<sup>1</sup>, Баярсайхан Сайнбуян<sup>1,2\*</sup>, Вандансамбуу Батцэнгэл<sup>1,2,3</sup>, Мандах Уртнасан<sup>4</sup>, Тэгшжаргал Нямаа<sup>5</sup>, Отгонбаяр Мэндбаяр<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Газарзүйн тэнхим, Шинжлэх Ухааны Сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, 210646, Монгол Улс

<sup>2</sup> Зайнаас тандан судлал, газарзүйн мэдээллийн системийн судалгааны лаборатори, Ахисан түвшний сургууль, Монгол Улсын Их Сургууль, 210646, Монгол Улс

<sup>3</sup> Хот, Бүс нутгийн хөгжлийн судалгааны хүрээлэн, Монгол Улсын Их Сургууль, Улаанбаатар 14200, Монгол улс

<sup>4</sup> Газарзүйн Мэдээллийн систем-Зурагзүйн салбар, Газарзүй-Геоэкологийн Хүрээлэн, Шинжлэх Ухааны Академи, Улаанбаатар 15170, Монгол Улс

<sup>5</sup> Хөдөө аж ахуйн их сургууль, Агроэкологийн сургууль, Улаанбаатар 15170, Монгол Улс

\*Харилцагч зохиогч: [sainbuyan.b@num.edu.mn](mailto:sainbuyan.b@num.edu.mn)

Хүлээн авсан: 2025.09.019

Засварласан: 2025.11.01

Зөвшөөрөгдсөн: 2025.11.04

### Хураангуй

Монгол орны хуурай болон хагас хуурай бүсэд экосистем нь маш эмзэг боловч ургамлын нөөцөөр баялаг юм. Энэхүү бүс нутаг нь цаг уурын экстремаль үзэгдлүүдийн нөлөөнд ихээр автдаг бөгөөд дэлхийн нүүрстөрөгчийн эргэлтийн чухал хэсэг болдог. Энэхүү судалгаанд 2000–2023 оны хоорондох Монгол орны нийт анхдагч бүтээмж (GPP), өдрийн хамгийн их ба хамгийн бага температур, өдрийн хур тунадасны өгөгдлийг ашиглан GPP-ийн орон зайн ба цаг хугацааны өөрчлөлтийн шинж чанар, мөн экстремаль уур амьсгалын үзэгдэлд үзүүлэх хариу урвалыг шинжилсэн. Судалгаанд чиг хандлагын шинжилгээ, МК-ийн өөрчлөлтийн тест, статистик шинжилгээ, бүтцийн тэгшитгэлийн загвар (SEM) зэрэг аргуудыг ашиглав. Судалгааны гол үр дүнгээр (1) GPP нь ерөнхийдөө өсөх чиг хандлагатай байгаа бөгөөд ялангуяа Монголын хойд хэсэгт 61% нь статистикийн хувьд ач холбогдолтой өсөлт үзүүлжээ. (2) Температурын индексүүд (SU, TNx, TNn) болон хур тунадасны индекс R20 нь ихэнх станцуудад нэмэгдэж байгаа бол R95P ба SDII нь буурах хандлагатай байна. (3) Хур тунадасны индексүүд нь нийтдээ GPP-д эерэг нөлөө үзүүлдэг ч баруун Монголын зарим нутгуудад сөрөг нөлөө үзүүлжээ. Ургамлын өсөлтийн үндсэн хөдөлгөгч хүчин нь R20 индекс болох нь тогтоогджоож байна. (4) TNx ба SU нь GPP-ийг бууруулдаг боловч нутгийн хойд хэсгээр зуны дулаарал нь ургамлын бүтээмжийг нэмэгдүүлдэг. R20 ба R95P индексүүд GPP-д сөрөг нөлөөтэй бөгөөд хур тунадасны эрчим нь дагалдах үүрэгтэй болохыг харуулж байна.

**Түлхүүр үгс:** Ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP), Экстремаль уур амьсгал, Цаг агаарын экстремаль индекс, Бүтцийн тэгшитгэлийн загварчлал, Монгол улс

©Зохиогчийн оруулсан хувь нэмэр: **Аялан, О.Мэндбаяр:** Онолын үндэслэл, үндсэн бичвэр, өгүүллийн эх бэлтгэл, үр дүнгийн хяналт, **Б.Сайнбуян:** аргазүй боловсруулалт, өгөгдөл боловсруулалт, **Т.Нямаа** өгөгдөл цуглуулалт, боловсруулалт, **В.Батцэнгэл, М.Уртнасан:** Үр дүнгийн хяналт.

## Оршил

Ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (Gross Primary Productivity, GPP) нь хуурай газрын экосистем дэх ногоон ургамал фотосинтезийн явцаар агаар мандлын CO<sub>2</sub>-ыг шингээн органик нэгдэл болгон хувиргаж хуримтлуулсан нийт энерги буюу биомассын хэмжээг илэрхийлэх бөгөөд экосистемийн анхны энергийн урсгалыг тодорхойлж, ургамлын өсөлт хөгжил, биомассын хуримтлал болон нүүрстөрөгчийн эргэлтийг үнэлэх үндсэн үзүүлэлт юм (Beer et al., 2010; Field et al., 1995).

GPP нь цаг уур, хөрс, ус чийг болон бусад хүчин зүйлсийн нөлөөгөөр хэлбэлздэг тул дэлхийн дулаарал, уур амьсгалын өөрчлөлтийн хүрээнд чухал судалгааны чиглэл болоод байна (Tang et al., 2022; Wang et al., 2020; Chen et al., 2019). GPP нь агаар мандал дахь CO<sub>2</sub>-ын концентрацийг зохицуулахад чухал үүрэгтэй (Wang et al., 2016). Түүнчлэн GPP нь дэлхийн агаар мандал болон шим мандлын хоорондын нүүрстөрөгчийн харилцан үйлчлэлийг үнэлэх гол үзүүлэлт болдог (Beer et al., 2010). GPP-ийн өөрчлөлт нь зөвхөн ургамлын өсөлтийн нөхцлийг илэрхийлээд зогсохгүй, янз бүрийн экосистемд уур амьсгалын өөрчлөлт хэрхэн хариу үйлдэл үзүүлж байгааг тодорхойлдог (Ge et al., 2021; Wu et al., 2022).

Дэлхийн уур амьсгалын өөрчлөлт эрчимжиж, хүний үйл ажиллагааны нөлөөлөл нэмэгдэж байгаатай холбоотойгоор хуурай газрын ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP) нь өөрчлөлтөд орж байна (Hui et al., 2022; IPCC., 2021; La Sorte., 2021). Ийм нөхцөлд GPP-ийн орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлтийг үнэн зөв, нарийвчлалтай тодорхойлох нь дэлхийн болон бүс нутгийн нүүрстөрөгчийн эргэлтийг үнэлэхэд ач холбогдолтой (Yan et al., 2016; Zelalem et al., 2016; Yao et al., 2018).

Дэлхийн уур амьсгалын өөрчлөлтийн асуудлаар засгийн газар хоорондын комиссын (IPCC) 2023 оны тайланд дурдсанаар, дэлхийн дундаж температур 2.5–2.9 °C-ээр нэмэгдсэн нь таамаглалаас давсан үзүүлэлт юм (Qin, 2014; Asadnabizadeh, 2023). Дулаарлын хурдацтай хандлага нь цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүдийн тоо, давтамжийг эрчимтэй нэмэгдүүлж, байгаль орчны гамшгийн гол шалтгаануудын нэг болоод байна (Zhou, Qian, 2021).

Цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүд нь гэнэтийн, хүчтэй, гамшгийн шинж чанартай цаг агаарын үзэгдлүүдийг хэлдэг (Borkhuu et al., 2023). Уур амьсгалын өөрчлөлтөөс ялгаатай нь богино хугацаанд асар их хор нөлөө үзүүлж, урьдчилан таамаглахад хүндрэлтэй байдаг. Ийм үзэгдлүүд нь хүн ам, нийгэм эдийн засгийн хөгжилд төдийгүй экосистемийн бүтэц, үйл ажиллагаанд сөрөг үр дагавар үзүүлдэг (Guobin et al., 2013; Aghakouchak et al., 2014; Wu et al., 2014; Muqier et al., 2025).

Эдгээр цаг агаарын экстремаль нөхцөлүүд болох хэт халалт, үер, ган болон бусад гамшигт үзэгдлүүд нь ургамлын доройтлыг бий болгох замаар экосистемийн тогтвортой байдалд ихээхэн саад учруулдаг (IPCC, 2012; Reichstein et al., 2013; Zhang et al., 2014; Yu et al., 2014). Цаг агаарын эдгээр экстремаль нөхцөл нь байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг үр дагаврыг улам гүнзгийрүүлж байна (Horton et al., 2015; Lloret et al., 2012). Цаг агаарын экстремаль нөхцөлд хамгийн мэдрэмтгий үйл явцын нэг нь фотосинтез бөгөөд GPP-ийн цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүдтэй уялдуулан судлах нь экосистемийн хариу үйлдлийг үнэлэхэд чухал юм (Ciais et al., 2005; Zhang et al., 2016; Ahlström et al., 2015).

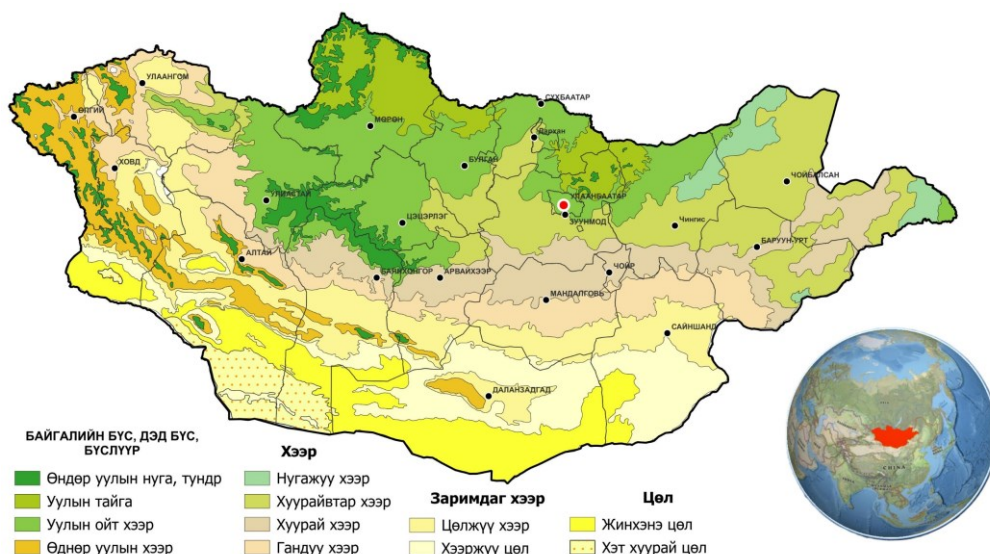
Температур, хур тунадас нь орон зайн янз бүрийн масштабын хүрээнд ургамлын динамик өөрчлөлтөд өөр өөр түвшинд нөлөөлдөг (Yu et al., 2004). Монгол орон уур амьсгалын хуурай гандуу бүс нутагт оршдог учир хур тунадас бага унадаг (Цэгмид, 1969; Dorjsuren et al., 2018). Ийм нөхцөл нь тус бүс нутгийг дэлхийн уур амьсгалын хамгийн эмзэг бүсүүдийн нэг болгожээ. Монгол Улс нь мал аж ахуй давамгайлсан бүс нутаг бөгөөд нутгийн иргэдийн амьжиргаа ихэвчлэн байгалийн бэлчээр, ургамлын нөөцөөс шууд хамааралтай (Siqin et al., 2018; Zhang et al., 2016; Dorjsuren et al., 2018; Erdenejargal et al., 2021), ургамлан бүрхэвч нь уур амьсгалын өөрчлөлт, цаг агаарын экстремаль үзэгдэлд их эмзэг байдаг (Chen et al., 2022). Энэ нь ургамлан бүрхэвчийн

бүтцэд өөрчлөлт оруулж, улмаар экосистемийн үйл ажиллагаа, түүний дотор энергийн урсгал, нүүрстөрөгчийн эргэлтийн тогтвортой байдалд сөрөг нөлөө үзүүлэх эрсдлийг нэмэгдүүлдэг (Gajewski, 2015). Иймд Монгол орны хэмжээнд GPP-ийн өөрчлөлтөд дүн шинжилгээ хийхдээ цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүд тухайн нутгийн ургамлын үржил шим үзүүлж болзошгүй нөлөөллийг харгалзан үзэх нь зайлшгүй юм.

Энэхүү судалгаа нь Монгол орны хэмжээнд ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP)-ийн орон зайн болон цаг хугацааны өөрчлөлтийг тодорхойлох, түүнчлэн цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүдийн (тухайлбал хур тунадас, температурын хэт их/бага үзүүлэлтүүд) GPP-д үзүүлэх нөлөөллийг системтэйгээр үнэлэхэд оршино.

### Судалгааны талбай

Монгол Улс нь Ази тивийн төв хэсэгт, хойд өргөргийн  $41^{\circ}35' - 52^{\circ}09'$  болон зүүн уртрагийн  $87^{\circ}44' - 119^{\circ}56'$  хооронд оршдог, нийт 1,564,100 км<sup>2</sup> газар нутагтай улс юм (Bayarsaikhan et al., 2020; Doljin, Embuu, 2021; Монгол улсын үндэсний атлас, 2022; ҮСХ., 2025). Улсын баруун хэсэг нь өндөр уулс, уулархаг бүс нутаг бөгөөд зүүн өмнөд хэсэг рүүгээ аажим тэгш тал, говийн бүсэд шилждэг (Цэгмид, 1969). Монгол орны нийт нутаг дэвсгэрийн 80 гаруй хувь нь далайн түвшнээс дээш 1000 метрээс өндөрт оршдог (Цэгмид, 1969; Doljin, Embuu, 2021). Баруун бүсийн Монгол Алтай, Говь Алтайн нуруудын дундаж өндөр 2500–3500 метр бол Хангай, Хэнтий, Хөвсгөлийн уулархаг бүсүүд дунджаар 2000–2500 метрийн өндөрт өргөгдсөн байдаг (Цэгмид, 1969; Батсүрэн нар, 2020; Doljin, Embuu, 2021). Жилийн дундаж температур говийн бүст  $8.5^{\circ}\text{C}$ , уулархаг нутгуудад  $-7.8^{\circ}\text{C}$  ба жилийн дундаж температур  $8-6^{\circ}\text{C}$  хооронд хэлбэлзэж, өмнө зүгээс хойд зүг чиглэлд буурдаг бол 50–400 мм хур тунадас буудаг бөгөөд хотгор гүдгэрийн нөлөө нутгийн хойноос урагш, зүүнээс баруун тийшлэх тутам байдаг (Нацагдорж, Хауленбек, 2012; Doljin, Embuu, 2021; Struck et al., 2022; Hao et al., 2023; Enkhbold et al., 2024). Монгол орны чийг-дулааны хангамжийн нөлөө нь бэлчээрийн ургамлын дулаан хангамжийн үзүүлэлт, гарцад нөлөөлдөг (Bayarsaikhan et al., 2020).



Зураг 1. Судалгааны талбай (Монгол улсын үндэсний атлас, 2022)

### Судалгааны материал

**Зайнаас тандан судлалын мэдээ:** Судалгаанд дунд зэргийн нарийвчлалтай спектрорадиометр бүхий MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) мэдрэгчийн GPP (Gross Primary Productivity) үзүүлэлтийг агуулсан MOD17A2H бүтээгдэхүүн ашигласан. Тус бүтээгдэхүүн нь 8

хоногийн давтамжтай, 500 метрийн орон зайн нарийвчлалтайгаар тооцон гаргадаг бөгөөд NASA-гийн сансрын судалгааны төвөөс албан ёсоор түгээгддэг (<https://www.nasa.gov/>).

Энэхүү судалгаанд 2000–2023 он хүртэлх Монгол орны нутаг дэвсгэрийг хамарсан ургамал ургах хугацаа (4-10 сар хүртэлх хугацаа)-ны 8 хоногийн давтамжтай GPP бүтээгдэхүүний өгөгдлийг ашигласан. Өгөгдлийг орчин үеийн нээлттэй эх сурвалжийн хиймэл дагуулын бүтээгдэхүүнүүдийг гаргадаг Google Earth Engine (GEE) платформ дээр боловсруулж, тухайн хугацаанд хамаарах бүх зургуудыг нийлүүлэн жил бүрийн ургамал ургах хугацааны нийлбэр ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP)-ний утгыг тооцоолсон. Энэхүү өгөгдөл нь Монгол орны ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүний олон жилийн өөрчлөлтийн хандлага, уур амьсгалын хүчин зүйлсийн хамаарлыг судлахад суурь өгөгдөл болдог.

**Цаг уурын мэдээ:** Монгол орны уур амьсгалын өөрчлөлтийн хандлага болон цаг агаарын экстремаль үзэгдлийн динамик өөрчлөлтийг тодорхойлох зорилгоор 2000 - 2023 оны өдөр бүрийн цаг уурын өгөгдлийг ашигласан. Тус өгөгдлийг АНУ-ын NOAA-ийн харьяа Байгаль орчны мэдээллийн үндэсний төв (NCEI)-өөс гаргасан, станц тус бүрийн өдөр тутмын цаг агаарын мэдээллийн багц (<https://ecocast.arc.nasa.gov/>) -ыг татан авсан.

Судалгаанд ашигласан өгөгдлийн багц нь хур тунадас, хоногийн хамгийн их температур ( $T_{max}$ ), хоногийн хамгийн бага температур ( $T_{min}$ ) зэрэг үндсэн цаг уурын элементүүдийг багтаасан бөгөөд эдгээр өгөгдлийг Монгол орны нутаг дэвсгэрт байрлах сонгосон цаг уурын станцуудаас авч, харьцуулан шинжилсэн болно. Өгөгдлийн чанарын шалгалт, цэвэрлэгээ, бүрэн бүтэн байдлын хяналтыг олон улсад хүлээн зөвшөөрөгдсөн RClimDex загвар ашиглан хийсэн. Уг загвар нь R програмчлалын хэл дээр суурилсан бөгөөд цаг уурын өгөгдлийг шалгах, экстремаль үзэгдлийн индексүүдийг тооцоолох, хандлагыг илрүүлэхэд өргөн хэрэглэгддэг юм.

Цаашид уур амьсгалын өөрчлөлтийн чиг хандлагыг тодорхойлох заагч үзүүлэлт болгон ашиглах зорилгоор, Дэлхийн уур амьсгалын судалгааны хөтөлбөрийн (WCRP) Уур амьсгалын өөрчлөлтийн илрүүлэлт ба индексийн шинжээчдийн баг (ETCCDI)-аас тодорхойлсон экстремаль температур болон хур тунадасны 6 индексийг (Хүснэгт 1) үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Ашигласан цаг агаарын экстремаль индексүүд

| Товчилсон нэр | Үзүүлэлтийн нэр                         | Тодорхойлолт                                                                                                        | нэгж               |
|---------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| SU            | Summer days                             | Жилийн өдөр бүрийн хамгийн их температур $25^{\circ}\text{C}$ -аас давсан өдрийн тоо                                | хоног              |
| TNx           | Max Tmin                                | Хоногийн хамгийн бага температурын хамгийн өндөр утга                                                               | $^{\circ}\text{C}$ |
| TNn           | Min Tmin                                | Хоногийн хамгийн бага температурын хамгийн бага утга                                                                | $^{\circ}\text{C}$ |
| R20           | Number of very heavy precipitation days | Жилийн хур тунадас 20 мм-ээс их буюу тэнцүү байсан өдрийн тоо                                                       | хоног              |
| SDII          | Simple daily intensity index            | Жилийн нийт хур тунадасны хэмжээг тухайн жилд хур тунадас 1.0 мм буюу түүнээс дээш орсон өдрийн тоонд хуваасан утга | мм/хоног           |
| R95p          | Very wet days                           | Хур тунадасны 95 хувийн төвшинг давсан өдрүүдийн хур тунадасны жилийн нийт хэмжээ                                   | мм                 |

## Судалгааны аргазүй

**Чиг хандлагын шинжилгээ:** Монгол орны 2000-2023 он хүртэлх ургамлын GPP, цаг агаарын экстремаль индексүүдийн орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлтөд дүн шинжилгээ хийх, цаг хугацааны цувааны өөрчлөлтийн ач холбогдлыг судлах зорилгоор Сенийн налуу ба Манн-Кендаллын тренд тестийг ашигласан (Akritas et al., 1995; Dingjun et al., 2023; Nyamaa et al., 2024). Тейл-Сены налуу болон Манн-Кендаллын ач холбогдлын шинжилгээний аргууд нь статистик шинжилгээгээр тодорхой өөрчлөлтийн чиг хандлагыг тооцдог. Үүнд:

$$\beta_{GPP} = \text{Median}\left(\frac{GPP_j - GPP_i}{j - i}\right), 2000 \leq i < j \leq 2023 \quad (1)$$

Энд,  $\beta_{GPP}$  нь бүх өгөгдлийн өөрчлөлтийн чиг хандалга. Хэрэв  $\beta > 0$  бол GPP-ийн өөрчлөлт өсөх хандлагатай,  $\beta < 0$  бол GPP-ийн өөрчлөлт буурах хандлагатай байна.  $GPP_i$  ба  $P_j$  нь  $i$  ба  $j$  хугацааны үеийн “GPP” хувьсагчийн утга бөгөөд дундаж утгыг илэрхийлнэ. Монгол орны 2000-2023 он хүртэлх ургамлын GPP, эрс тэс уур амьсгалын өөрчлөлтийн чиг хандлагын ач холбогдлыг илрүүлэхийн тулд Манн-Кендаллийн чиг хандлагын арга ашиглав.

МК-ийн тестийн статистик эерэг ба сөрөг шинж тэмдгүүдээс хамаардаг тул МК тестийн чиг хандлагууд нь өгөгдлийн цуваанд гарсан хэт их нөлөөлөл өөрчлөлтийг тодорхойлдог (Karpouzou et al., 2010; Sumiya et al., 2020; Magsar et al., 2021; Dorjsuren et al., 2024; Bilguun et al., 2023).

Энэ судалгаанд Манн-Кендаллын өөрчлөлтийн аргыг ашиглан цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүдэд цаг хугацааны янз бүрийн масштабаар өөрчлөлт байгаа эсэхийг судалсан. Өөрчлөлт гэдэг нь урт хугацааны цуваа харьцангуй тогтвортой төлөвөөс нөгөөд шилжих үзэгдлийг хэлнэ. Манн-Кендаллын өөрчлөлтийн арга нь хувьслыг тодорхойлох, өөрчлөлтийн илрүүлэх гол аргуудын нэг юм (Sumiya et al., 2020; Dorjsuren et al., 2024).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(GPP_j - GPP_i) \quad (3)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sign}(GPP_j - GPP_i) = \begin{cases} 1, GPP_j - GPP_i > 0 \\ 0, GPP_j - GPP_i = 0 \\ -1, GPP_j - GPP_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Энд Манн-Кендаллийн ач холбогдлын туршилтын аргын (Zhou et al., 2023; Nyamaa et al., 2024)  $Z$  утгыг GPP-ийн өөрчлөлтийн чиг хандлагын ач холбогдлыг шалгахад ашигладаг.  $GPP_i$  ба  $GPP_j$  нь  $i$  ба  $j$  хугацааны хувьсагчийн утгууд,  $n$  нь хугацааны цувааны урт,  $\text{sign}$  нь ач холбогдлын үзүүлэлтийн функц.  $Z < 0$  бол буурах хандлагыг илэрхийлнэ; харин  $Z > 0$  өсөх хандлагыг харуулдаг. Энэхүү судалгаанд  $\alpha = 0.05$  болон  $|Z| > 1.96$  үед өгөгдөл 95%-ийн ач холбогдлын түвшингээр тохируулсан.

**Пирсоны корреляцийн шинжилгээ:** нь цэгэн диаграммыг байгуулах замаар шугаман хамааралтай эсэхийг тодорхойлдог (Dagvadorj et al., 2009; Мөнхбат нар., 2022). Монгол орны цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүдийн GPP-д үзүүлэх нөлөөллийг судлахын тулд Пирсон корреляцийн коэффициентийн аргыг ашиглан GPP болон цаг агаарын экстремаль индекс хоорондын хамаарлыг тооцоход ашиглав. Дараах томъёогоор тооцов.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

Томъёонд:  $r$  нь корреляцийн коэффициент;  $x$  ба  $y$  нь GPP болон цаг агаарын экстремаль индекс тус бүрийн утгыг илэрхийлнэ.  $\bar{x}$  ба  $\bar{y}$  нь GPP болон цаг агаарын экстремаль индексийн дундаж утгыг тус тус илэрхийлнэ.  $R$ -ийн ач холбогдлыг  $\alpha=0.05$ ,  $\alpha=0.01$  түвшинд шалгасан.

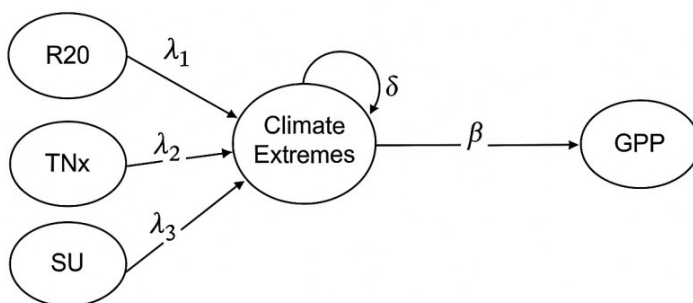
**Бүтцийн тэгшитгэлийн загварчлал (SEM):** нь олон хувьсагчийн статистикийн чухал арга бөгөөд таамагласан (далд) болон ажиглагдсан хувьсагчдын хоорондын нарийн хамаарлыг нэгэн зэрэг үнэлдэг бүрэн загварчлалын арга юм. Энэ нь замын анализ (path analysis), хүчин зүйлийн анализ (factor analysis), хамгийн их магадлалын үнэлгээ (maximum likelihood estimation) зэрэг

аргуудыг нэгтгэдэг (Fan et al., 2016). SEM-ийн давуу тал нь хувьсагчдын шууд болон шууд бус нөлөөг тоон хэлбэрээр илэрхийлж, олон хүчин зүйлийн харилцан үйлчлэлийг бүхэлд нь тайлбарлах боломж олгодог. SEM нь хоёр үндсэн бүрэлдэхүүнтэй:

Бүтцийн загвар - далд хувьсагчдын хоорондын шалтгаант хамаарлыг илэрхийлнэ. Энэ хамаарлыг замын коэффициент ( $\beta$ ) ашиглан үнэлдэг.  $\beta$ -ийн утга  $-1$ -ээс  $+1$  хүртэл хэлбэлзэх ба стандартчилагдаагүй тохиолдолд  $\pm 1$ -ээс хэтрэх боломжтой.

Хэмжилтийн загвар - ажиглагдсан хувьсагчид далд хувьсагчидтай хэрхэн холбогдож байгааг тодорхойлдог. Далд хувьсагчид нь шууд хэмжигдэхгүй боловч хоорондоо уялдаа бүхий ажиглагдсан хувьсагчдын дисперсийн үндсэн дээр тооцогддог тул судалгааны онолын бүтэцтэй илүү нийцдэг.

Энэ судалгаанд SEM-ийг ашиглан ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP) үзүүлэх цаг агаарын экстремаль индексүүд (R95P, R20, SDII, SU, TNn, TNx)-ийн шууд ба шууд бус нөлөөллийг загварчлахад ашигласан. SEM-ийг загварыг Зураг 2-г үзүүлэв.



Зураг 2. SEM загвар

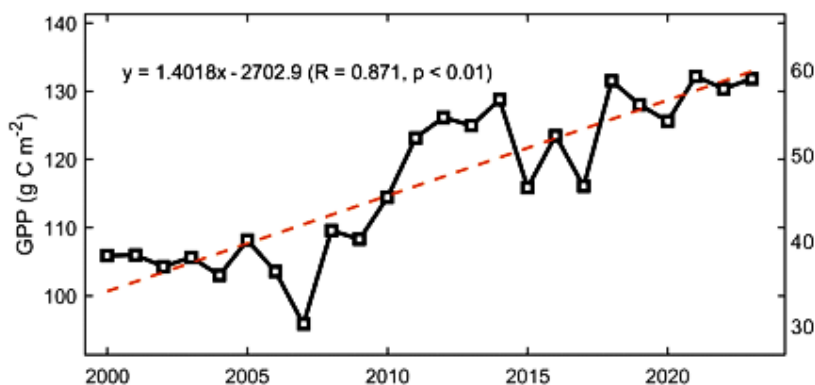
GPP хүртэлх хувьсагчдын хоорондох сумнууд нь шалтгаан ба үр дагаврын хамаарлыг тодорхойлно. Энд:  $\lambda$ -Хэмжилтийн загварын коэффициент,  $\beta$  – Замын коэффициент,  $\delta$  – Climate Extremes-ийн дотоод алдаа Загвар нь судалгааны өгөгдлийг ашиглан бүтээгдсэн бөгөөд R SEM-ийн lavaan багцыг ашиглахад тохиромжтой.

### Судалгааны үр дүн

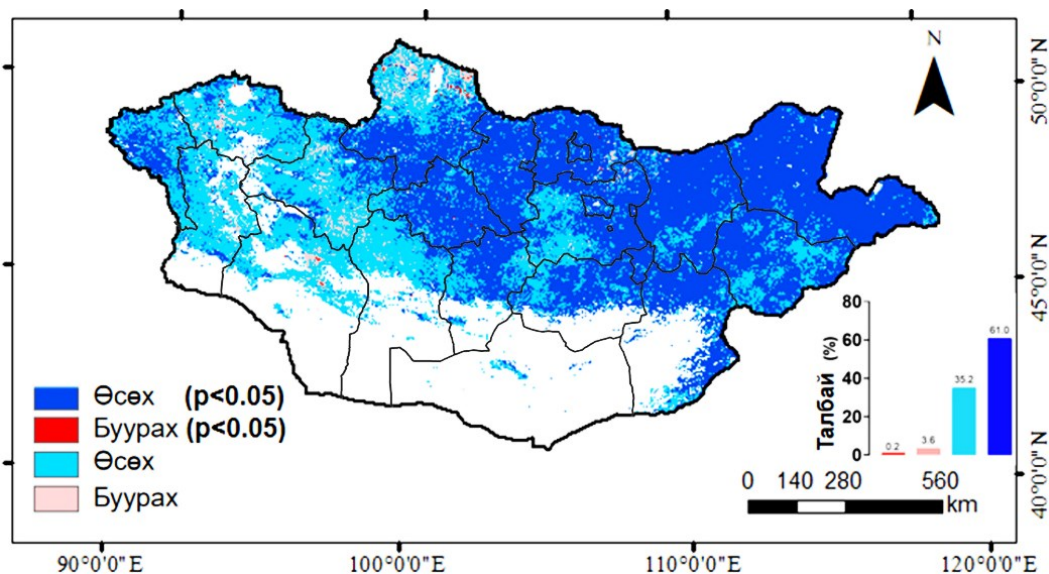
**Ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP)-ий орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлт:** Монгол орны хэмжээнд 2000–2023 оны хооронд ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP) нь өсөх хандлагатай(Зураг 3), жилд дунджаар  $1.40 \text{ г С м}^{-2}$ -ийн өсөлттэй ( $p < 0.01$ ), судалгааны хугацаанд GPP-ийн утга хамгийн өндөр хэмжээ 2022 онд  $132.2 \text{ г С м}^{-2} \text{ жил}^{-1}$  хүрсэн. Харин хамгийн бага хэмжээ нь 2007 онд  $96 \text{ г С м}^{-2}$ -аар хэмжигдсэн ба бусад жилүүдэд GPP-ийн утга  $100 \text{ г С м}^{-2} \text{ жил}^{-1}$ -ээс дээш байна.

Монгол орны нийт нутгийн хэмжээнд 2000–2023 оны хооронд ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP)-ийн чиг хандлагын орон зайн өөрчлөлтийг зураг 4-д харууллаа. Судалгааны үр дүнгээс харахад сүүлийн 24 жилийн хугацаанд Монгол орны хэмжээнд GPP орон зайнаар авч үзвэл нийт талбайн 96.2 хувьд GPP нэмэгдэх чиг хандлага ажиглагдсан бөгөөд үүнээс 61 хувь нь статистикийн хувьд ач холбогдолтой, өсөлттэй байна.

GPP нэмэгдсэн бүс нутагт Дорнод, Хэнтий, Сүхбаатар, Сэлэнгэ болон Булган аймгийн зарим нутгууд багтаж байна. Харин судалгааны талбайн ердөө 3.8 хувьд GPP буурах чиг хандлага илэрч, хамгийн их өөрчлөлтөд өртсөн бүсүүдэд төвийн Увс, Хөвсгөл аймгийн хойд хэсэг, мөн Говь-Алтай аймгийн хойд хэсэг орж байна. Гэвч эдгээр бүс нутгийн дунд зөвхөн 0.2 хувь нь статистикийн хувьд ач холбогдолтой, мэдэгдэхүйц бууралттай байгаа бөгөөд тэдгээрийн орон зайн тархалт нь тодорхой төвлөрөлгүй, тархай хэлбэртэй байна.



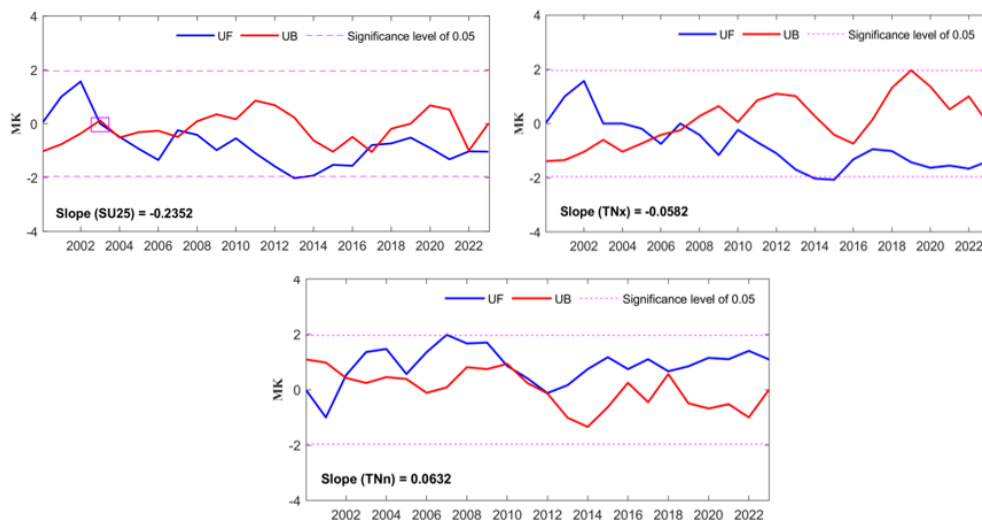
Зураг 3. GPP-ийн хугацааны өөрчлөлт



Зураг 4. Монгол орны 2000-2023 оны хугацааны жилийн дундаж GPP-ийн өөрчлөлт

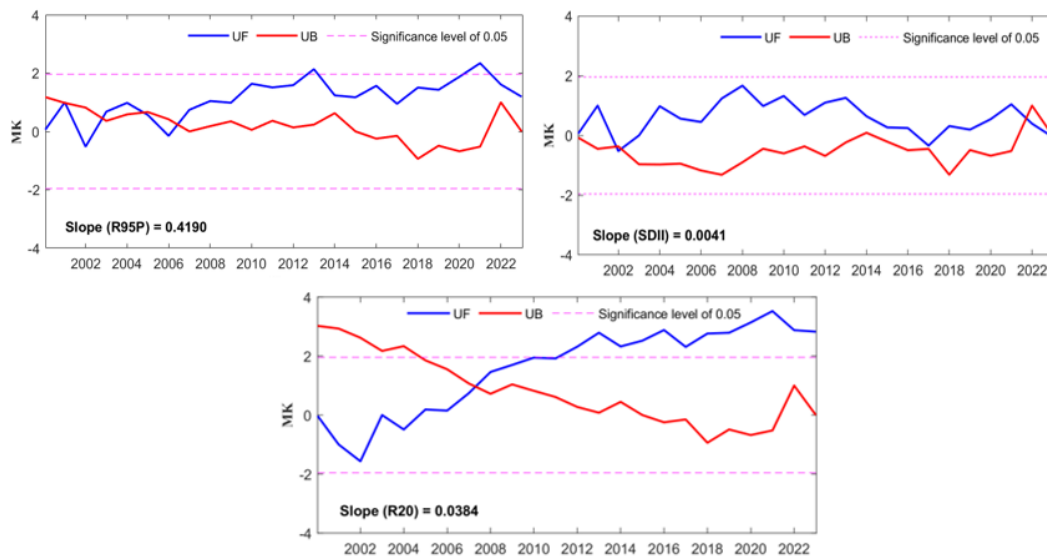
**Цаг агаарын экстремаль индексүүдийн орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлт:** Температурын индексийн хугацааны чиг хандлагаар Монгол орны 2000–2023 оны хооронд экстремаль температурын индексүүдийн цаг хугацааны хэлбэлзлийн чиг хандлагыг үзүүлсэн бөгөөд үүнд Манн-Кендал (МК) тестийн үр дүн, трендийг илэрхийлэх UF (өөрчлөлтийн хандлага), түүнчлэн хандлагын урвуу дарааллын статистик болох UB үзүүлэлтүүдийг тус тус хамруулсан.

Эндээс температурын экстремаль индекс SU буюу зуны хэт халуун өдрийн тоо нь арван жилд дунджаар 2.4 хоног-оор буурах хандлагатай байгааг харуулж байна. МК тестийн үр дүнгээр 2003 оноос өмнөх хугацаанд МК статистикийн утгууд  $1.96 +$  гарсан нь энэ хугацаанд SU өсөх хандлагатай байсныг илтгэж байна. Харин 2003 оноос хойш МК утгууд бүгд 0-ээс бага болсон нь буурах чиг хандлага давамгайлж эхэлснийг илтгэнэ. SU индекс нь 2003 онд илэрсэн өөрчлөлтийн цэг нь SU индексийн чиг хандлага эрс өөрчлөгдсөнийг тодорхой харуулж байгаа бөгөөд энэ цэгийг өмнөх ба дараах хугацаанд хандлага өөрчлөгдсөн эргэлтийн цэг гэж үзэх үндэслэлтэй. Хоногийн хамгийн бага температурын хамгийн өндөр утга буурах хандлагатай байгаа бол хоногийн хамгийн бага температурын хамгийн бага утга нь  $0.6^{\circ}\text{C}/10$  жилээр өсөх хандлагатай байгааг харуулж байна (Зураг 5).



Зураг 5. Монгол орны 2000-2023 оны агаарын температурын индексийн хугацааны чиг хандлага

Хур тунадасны индексийн хугацааны чиг хандлагаар R95P ба SDII индексүүдийн хэлбэлзэл нь 4.2 мм/10 жил, 0.04 мм/өдөр/10 жил тус тус өсөх хандлагатай байгааг харуулж байна. R20 нь 0.4 хоног/10 жилээр өсөх хандлагатай байгааг харуулж байна. MK тестээр 2005 оноос өмнөх утгууд 0-ээс бага байгаа нь тухайн хугацаанд буурах хандлагыг харуулж байгаа бол 2005 оноос хойшхи утгууд 0-ээс их байгаа нь өсөх хандлагатай байгааг харуулж байна. R20 нь 2010 оны ач холбогдлын түвшнээс давсан бөгөөд түүнээс хойш энэ нь мэдэгдэхүйц өсөх хандлагатай байв. Түүнчлэн, R20 нь 2007 онд огтлолцох цэгтэй бөгөөд энэ нь 2007 онд өөрчлөлтийн цэгийг харуулж, тус цэгээс өмнө болон дараа нь чиг хандлага өөрчлөгдөөгүй байна (Зураг 6).

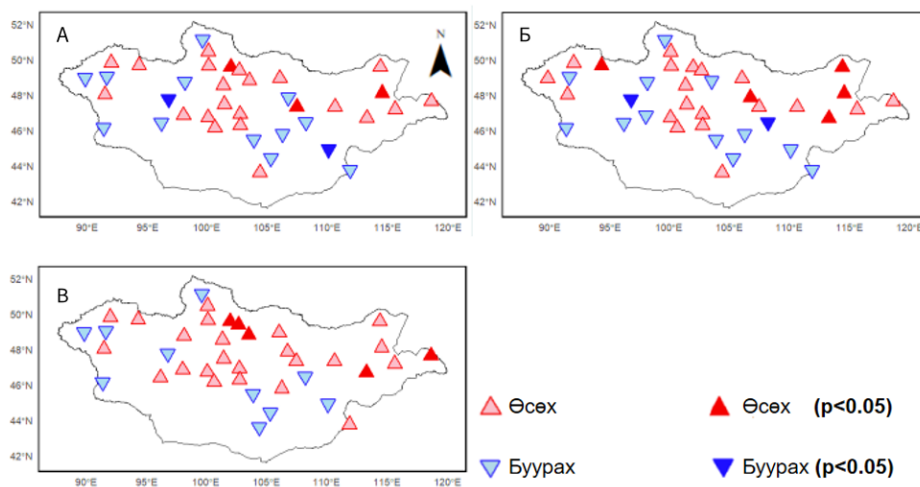


Зураг 6. Монгол орны 2000-2023 оны хур тунадасны индексийн хугацааны чиг хандлага

Температурын индексийн орон зайн тархалтаар Монгол орны зуны хэт халуун өдрүүдийн (SU) жил хоорондын хэлбэлзлийн чиг хандлагын орон зайн тархалтаас SU нь судалгааны станцуудын 63.2%-д өсөх хандлагатай, 36.8%-иар буурах хандлагатай байгаа нь харагдаж байна. Эдгээрээс 7.9%, 5.3% нь ач холбогдлын шалгуурыг давсан байна. Ерөнхийдөө SU орон зайн өсөлтийн чиг хандлагыг харуулж байна (Зураг 7А).

Сүүлийн 24 жилийн хоногийн хамгийн бага температурын хамгийн өндөр утга (TNx) жил хоорондын өөрчлөлтийн чиг хандлагын орон зайн тархалтаас TNx нь судалгааны станцуудын

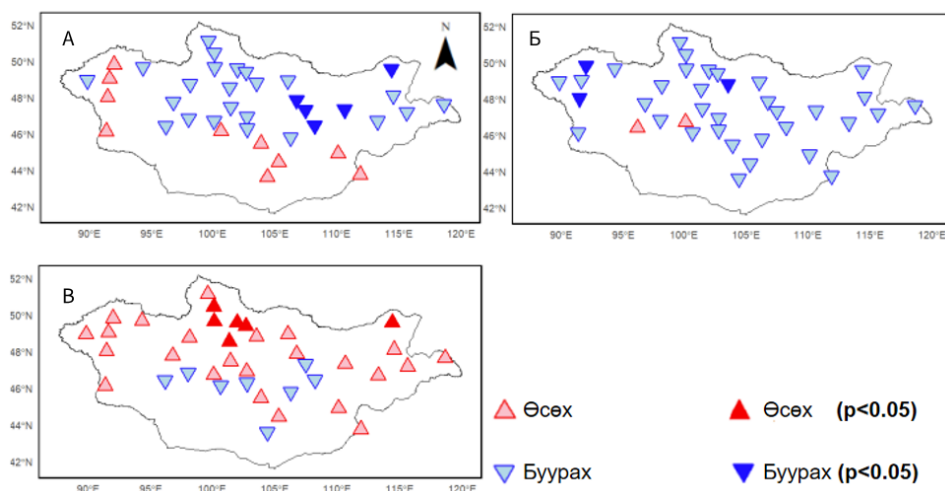
63.2%-д өсөх хандлагатай, 36.8%-д буурах хандлагатай байгааг харуулж байна (Зураг 7Б). Эдгээрээс станцуудын 10.5% болон 5.3% нь ач холбогдлын шалгуурыг давсан байна. Хоногийн хамаг бага температурын хамгийн бага утга (TNn) жил хоорондын хэлбэлзлийн чиг хандлагын орон зайн тархалтын хувьд TNn нь судалгааны станцуудын 73.7% -д өсөх хандлагатай, 26% -иар буурах хандлагатай байгааг харуулж байна (Зураг 7В). Эдгээрийн дундаас өсөх хандлагатай станцуудын 13.2% нь статистикийн ач холбогдлын түвшинг давсан бол буурах хандлагатай станцуудын аль нь ч уг шалгуурыг хангаагүй байна. Ерөнхийдөө TNn болон TNx индексүүд нь орон зайн хувьд нэмэгдэх буюу дулаарах чиг хандлагыг илтгэн харуулж байна.



Зураг 7. Монгол орны 2000-2023 оны хугацааны А. SU-ийн өөрчлөлт, Б. TNx-ийн өөрчлөлт, В. TNn-ийн өөрчлөлт

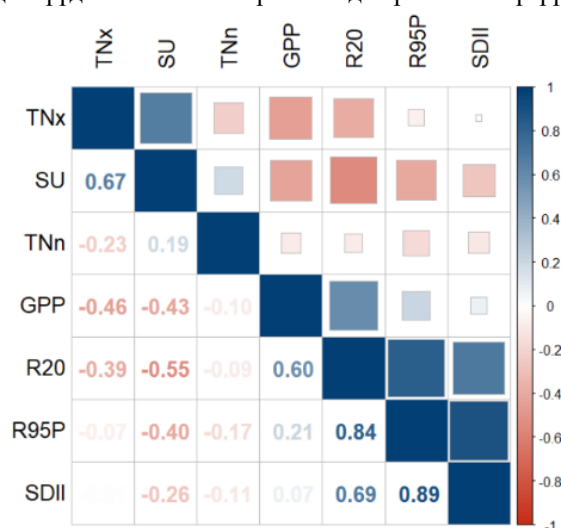
**Хур тунадасны индексийн орон зайн тархалтаар** Сүүлийн 24 жилийн хугацаанд Монгол орны хэмжээнд чийг ихтэй өдрүүдийн (R95p) жил хоорондын хэлбэлзлийн орон зайн тархалтаас харахад станцуудын 26.3% нь өсөх хандлагатай байгаа бол 73.7% нь буурах хандлагатай байгааг харуулж байна (Зураг 8А). Эдгээрээс өсөлтийн хандлагатай станцуудын аль нь ч ач холбогдлын шалгуурыг даваагүй бол буурах хандлагатай станцуудын 13.2% нь тэнцээгүй байна. Жилийн дундаж хур тунадасны эрчим (SDII) жил хоорондын хэлбэлзлийн орон зайн тархалтаас харахад ихэнх станцууд (94.7%) буурах хандлагатай байгаа бөгөөд эдгээр станцын 7-н үзүүлэлтийг 7%-иар давсан байна (Зураг 8Б). Ерөнхийдөө R95P болон SDII нь орон зайн хувьд буурах хандлагыг харуулж байна.

Хур тунадас ихтэй өдрүүдийн тоо (R20) станцуудын 78.9% -д өсөх хандлагатай, 21.1% -д буурах хандлагатай байгаа бөгөөд ач холбогдлын тестийг 15.8%, 0.0% тус тус давсан байна (Зураг 8В). Ерөнхийдөө R20 орон зайн өсөлтийн чиг хандлагыг харуулж байна.



Зураг 8. Монгол орны 2000-2023 оны хугацааны А. R95P-ийн өөрчлөлт, Б. SDII-ийн өөрчлөлт, В. R20-ийн өөрчлөлт

**GPP-ийн орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлт, эрс тэс уур амьсгалын үзүүлэх нөлөө:** GPP болон цаг агаарын экстремаль индексийн хамаарлыг авч үзвэл дараах байдалтай байна. GPP болон цаг агаарын экстремаль индексүүдийн хамаарлыг үнэлэх зорилгоор корреляцийн шинжилгээ хийсэн бөгөөд үр дүнг 9-р зурагт үзүүлэв. Судалгааны үр дүнд, GPP-тэй хамгийн хүчтэй эерэг хамааралтай индекс нь R20 байсан бөгөөд корреляцийн коэффициент нь 0.60 байв. Харин R95P болон SDII индексүүд нь GPP-тэй эерэг хамааралтай боловч харьцангуй сул хамааралтай байгааг харуулсан бөгөөд тэдгээрийн коэффициентүүд нь 0.21 ба 0.07 байна. Эсрэгээрээ, SU, TNx, TNn индексүүд нь GPP-тэй сөрөг хамааралтай гарсан. Тэдгээрийн дотроос TNx болон SU индексүүд нь GPP-тэй дунд зэргийн сөрөг хамааралтай байсан бөгөөд корреляцийн коэффициентүүд нь -0.46 ба -0.43 байна. TNn индексийн хувьд GPP-тэй хамаарал сул (-0.10) байгааг харуулж байна. Эдгээр үр дүнгээс харахад экстремаль хур тунадасны индексүүд нь GPP-ийн өсөлтийг эерэгээр дэмжиж байхад, экстремаль температурын индексүүд, ялангуяа хоногийн хамгийн бага температурын хамгийн бага утга нь GPP-д статистикийн хувьд мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлээгүй байна. Харин зарим температурын индексүүд нь GPP-ийн өөрчлөлтөд сөрөг нөлөө үзүүлжээ (Зураг 9).



Зураг 9. GPP болон цаг агаарын экстремаль үзэдлүүдлийн харилцан хамаарал

***GPP ба цаг агаарын экстремаль индексүүдийн хоорондын хамаарлын орон зайн тархалт:***

Монгол орны ургамал ургах хугацааны GPP болон цаг агаарын экстремаль индексүүдийн хоорондын хамаарлын орон зайг тооцон зурагт 10-т үзүүлэв. Экстремаль температурын индексийн хувьд GPP болон SU хоёрын хооронд эерэг хамаарал бүхий бүс нутгууд 5.1%-ийг эзэлдэг бөгөөд 3%-д ихээхэн эерэг хамаарал ( $p < 0.01$ ) ажиглагдаж байгаа нь үндсэндээ Хөвсгөл аймаг, Хангайн нуруу, Алтайн нуруу орчим байна. Үүний эсрэгээр сөрөг хамаарал бүхий бүс нутгууд 49.7%-ийг эзэлдэг ба 32%-д нь ихээхэн сөрөг хамааралтай ( $p < 0.01$ ) голчлон Монголын төв болон зүүн хэсэгт тархсан байна (Зураг 10А). Энэ хамаарлын загвар нь өндөр температурын процессууд нь ургамлын ургалтыг дарангуйлж, усны ууршилтыг нэмэгдүүлэх боломжтойг харуулж байна. Сөрөг нөлөөлөл нь ялангуяа хур тунадас багатай хуурай болон хагас хуурай бүс нутагт ажиглагдаж байна.

TNx болон GPP-ийн хоорондын орон зайн хамаарлын тархалтаас харахад, нийт судалгааны талбайн ердөө 1.10% нь эерэг хамааралтай, үүнээс статистикийн хувьд маш чухал эерэг хамааралтай бүс ( $p < 0.01$ ) нь 0.02%-ийг л эзэлж байна. Харин сөрөг хамааралтай бүс нутгийн эзлэх хувь харьцангуй өндөр буюу 28.40% бөгөөд статистикийн хувьд онцгой мэдэгдэхүйц сөрөг хамааралтай ( $p < 0.01$ ) хэсэг нь 10.80%-ийг хамарч байна. Эдгээр сөрөг хамааралтай бүсүүд нь ихэвчлэн Зүүн хэсгийн Сүхбаатар, Хэнтий аймгуудын өмнөд хэсэгт төвлөрсөн байна (Зураг 10Б). TNn ба GPP-ийн хоорондын хамаарлын хувьд ерөнхийдөө эерэг хамаарал зонхилж байгаа боловч, статистикийн хувьд сул эерэг хамаарал ( $p < 0.01$ ) бүхий бүс ердөө 0.02% байна. Харин сөрөг хамааралтай бүсүүд 2.20%-ийг эзэлж, үүнээс сул сөрөг хамаарал ( $p < 0.01$ ) нь 0.04%-д хязгаарлагдаж байгаа бөгөөд энэ нь голчлон Завхан аймгийн нутгаар байна (Зураг 10В).

Эдгээр дүнгээс харахад, экстремаль температурын индексүүд (TNx ба TNn) нь Монгол орны ихэнх нутагт ургамлын анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP)-д хязгаарлагдмал нөлөөтэй байгааг харуулж байна. Эерэг болон сөрөг хамаарал бүхий бүсүүдийн орон зайн ялгаатай байдал нь нийт нутгийн цаг уурын онцлог, уур амьсгалын нөхцөл байдалтай холбоотой байх магадлалтай. Тухайлбал, өндөр температур нь хуурай бүс нутгуудад ургамлын өсөлтийг сааруулах, харин бага температурын тодорхой хэмжээний өсөлт нь хүйтний стрессийг бууруулах замаар эерэг нөлөө үзүүлэх боломжтой хэдий ч энэ нь орчин нөхцөлөөс хамааран зөвхөн зарим бүс нутагт илэрдэг болохыг тус үр дүн тусгаж байна.

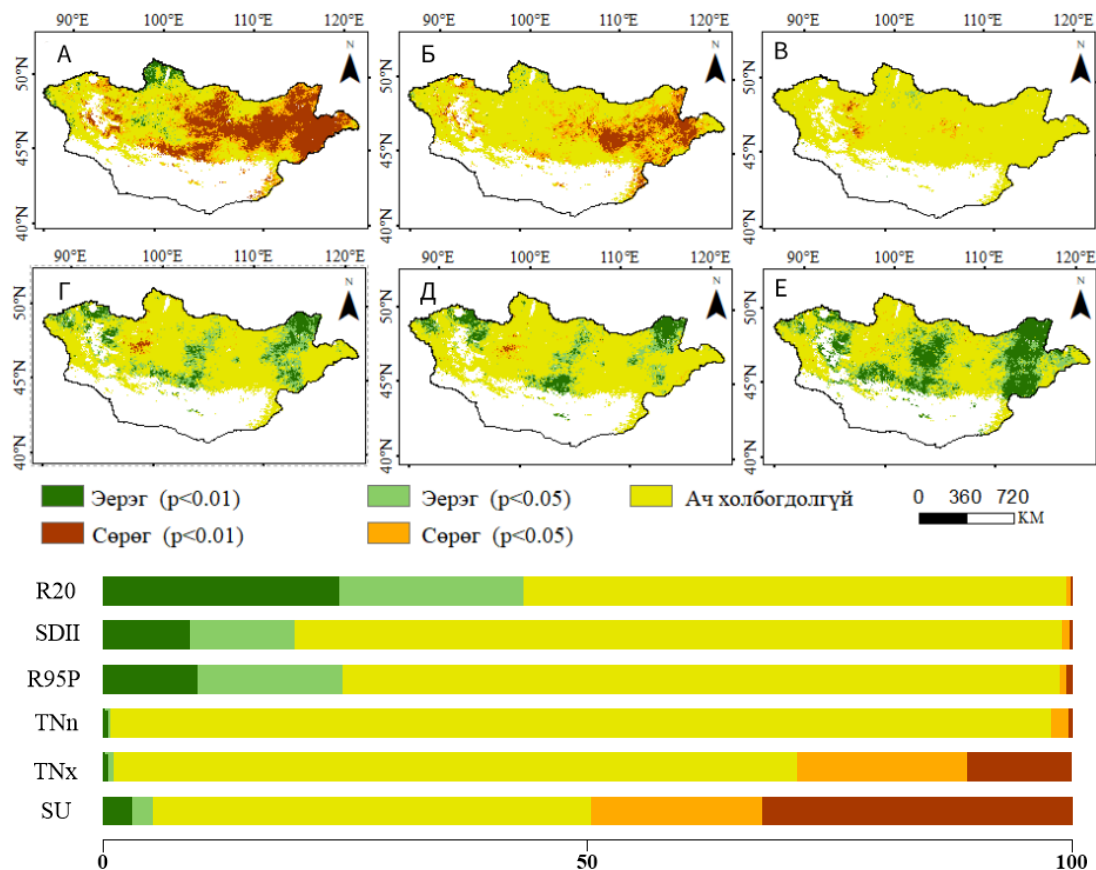
Экстремаль тунадасны индексүүд болох R95P, SDII ба GPP-ийн хоорондын хамаарлын коэффициентүүдийн орон зайн хуваарилалт нь ижил төстэй хандлагыг харуулж байна. R95P индексийн хувьд, GPP-тэй эерэг хамааралтай газрууд нийт судалгааны талбайн 24.7%-ийг эзэлж байгаа ба үүнээс 9.7% нь статистикийн хувьд хүчтэй эерэг хамааралтай ( $p < 0.01$ ) байна. Эдгээр эерэг хамааралтай газрууд нь Зүүн бүсийн аймгууд, Сүхбаатар, Увс аймаг болон төвийн бүс нутагт төвлөрсөн байна.

SDII индексийн хувьд ч мөн адил, нийт талбайн 19.8% нь эерэг хамааралтай, үүнээс 9% нь статистикийн хүчтэй чухал эерэг хамаарал ( $p < 0.01$ )-тай бөгөөд R95P-ийн орон зайн тархалтын загвартай төстэй байна. Харин сөрөг хамааралтай газруудын эзлэх хувь бага буюу R95P-ийн хувьд 1.3%, SDII-ийн хувьд 1% бөгөөд эдгээрээс 0.6% ба 0.3% нь хүчтэй сөрөг хамааралтай ( $p < 0.01$ ) газрууд ба Завхан аймгийн нутгаар (R95P: Зураг 10Г, SDII: Зураг 10Д) тодорхой харагдаж байна.

Эдгээр үр дүн нь хур тунадасны эрчмийн нэмэгдэл ургамлын өсөлтийг тодорхой хэмжээнд дэмждэг болохыг харуулж байна. Монгол орны төв болон зүүн хэсгээр харьцангуй хуурай бүсүүдэд, дунд зэрэг хур тунадас нэмэгдэх нь ургамлын анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP)-ийн өсөлтөд чухал хувь нэмэр оруулдаг. Үүнийг хүчтэй эерэг хамаарал бүхий бүс нутгийн хэмжээ (R95P: 9.70%, SDII: 9.00%) бататгаж байна. Нөгөө талаар, Завхан аймгийн орчимд сөрөг хамааралтай газрууд нь тухайн бүс нутгийн хөрсний ус нэвчилтийн чадвар муу, хэт их хур тунадас орсноор хөрсний агааржилт багасаж, үндэсний амьсгал болон ургалт саарах магадлалтайг илтгэж байна. Нэмж хэлэхэд, хур тунадасны эрчмийн огцом нэмэгдэл нь зарим төрлийн ургамалжилтад сөрөг нөлөө үзүүлж, улмаар GPP буурахад хүргэсэн байж болох юм.

R20 индекс нь GPP-тэй эерэг хамааралтай талбайн 43.4%-д ажиглагдаж байгаа бөгөөд эдгээрийн 24.4%-д статистикийн хувьд хүчтэй эерэг хамаарал ( $p < 0.01$ ) илэрсэн байна. Эдгээр талбайнууд нь голчлон Монгол орны зүүн болон төвийн бүс нутаг, мөн нууруудын хөндий орчимд тархсан байна. Харин R20 индексийн GPP-тэй сөрөг хамааралтай хэсэг нь нийт талбайн 0.6%-ийг эзэлж байгаа бөгөөд тэдгээрийн дотроос 0.20%-иас бага хувь нь статистикийн хувьд хүчтэй сөрөг

хамааралтай ( $p < 0.01$ ) байгааг харуулж байна. Нууруудын хөндий орчимд усны эх үүсвэр аль хэдийн элбэг байдаг хэдий ч хур тунадасны давтамж нэмэгдэх нь орон нутгийн ус зүйн орчны чийгийн түвшинг нэмэгдүүлж, ургамлын өсөлт болон фотосинтезийг дэмжих усны нэмэлт эх үүсвэрийг бүрдүүлдэг. Иймд хур тунадасны давтамжийг илэрхийлдэг индексүүд нь ургамлын ургалт болон GPP-д эерэг нөлөө үзүүлдэг (Зураг 10).

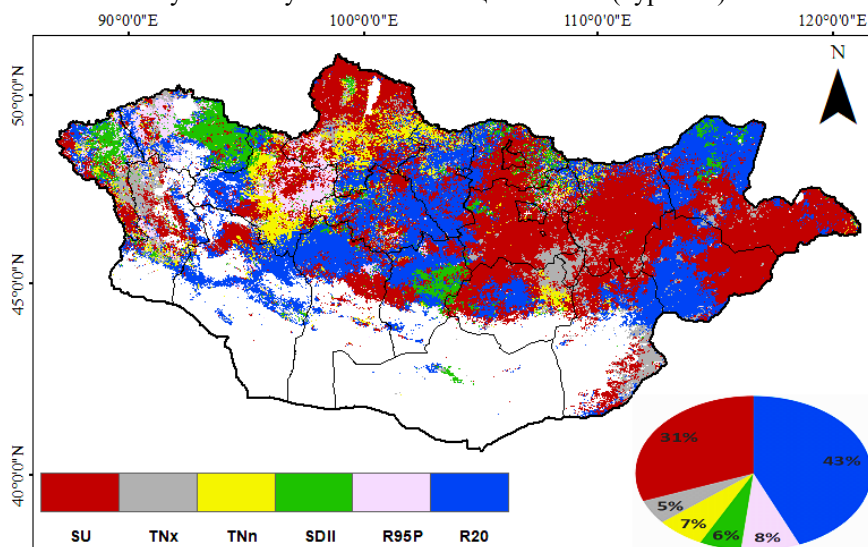


Зураг 10. GPP болон цаг агаарын экстремаль индексийн орон зайн хамаарал (A.SU, Б.TNx, В.TNn, Г. R95P, Д. SDII, E.R20)

Цаг агаарын экстремаль индексүүд GPP-д үзүүлэх нөлөө дээрх дүн шинжилгээнд үндэслэн GPP нь цаг агаарын өөр өөр хүчин зүйлээс шалтгаалж ялгаатай нөлөө үзүүлэх механизмыг харуулдаг болохыг тогтоосон. Эдгээр ялгаануудын үндэс суурь болох орон зайн тархалтын шинж чанарыг цаашид судлахын тулд энэхүү судалгаа нь өөр өөр бүс нутгуудад GPP-ийн өөрчлөлтийн давамгайлах цаг агаарын хүчин зүйлийг тодорхойлсон. Үр дүнгээс Монгол орны GPP-д хамгийн их нөлөөлсөн хүчин зүйл нь хур тунадас ихтэй өдрийн тоо (R20) бөгөөд энэ нь нийт нутгийн 43% орчимд, дараа нь зуны хэт халуун өдрийн тоо (SU) 31%-ийг эзэлж байна. TNx, TNn, SDII, R95P-ийн өөрчлөлтөд хамгийн мэдрэмтгий бүс нутгууд нь голчлон Монгол орны баруун хэсэг болон томоохон нуруудаар өндөр уулсын бүс нутагт тархсан байдаг. Эдгээр өндөр уулын бүс нутагт хоногийн температурын их хэлбэлзэл нь фотосинтез, амьсгал зэрэг ургамлын физиологийн процесст ихээхэн нөлөөлдөг. Үүнээс гадна эдгээр бүс нутагт атмосферийн даралт бага, нимгэн агаар, усны мэдрэмжтэй нөхцөл байдал нь экстремаль температур, хур тунадасны өөрчлөлтөд ургамлын хариу үйлдлийг нэмэгдүүлдэг.

Эдгээр нь газарзүйн янз бүрийн нөхцөлд GPP-ийн давамгайлж буй цаг агаарын хүчин зүйлсийн орон зайн ялгаатай байдлыг онцолдог. Тэд бүс нутгийн экологийн хамгаалал,

менежментийн стратегийг боловсруулахдаа ургамлын үржил шимт уур амьсгалын өөрчлөлтийн ялгавартай нөлөөллийг тусгах нь чухал болохыг онцолж байна (Зураг 11).



Зураг 11. Хүчин зүйлсийн орон зайн нөлөө

**Цаг агаарын экстремаль үзэгдлийн GPP-д үзүүлэх нөлөөллийн шинжилгээ:** SEM нь GPP-д цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүдийн нөлөөг тоон байдлаар үнэлэхэд ашигласан. Загварын тохирлын үзүүлэлтүүд нь загвар нь нийт өгөгдлийг сайн тайлбарлаж байгааг харуулсан ( $\chi^2 = 5.343$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.069$ ). Энэ нь тухайн загвар нь хувьсагчдын хоорондын гол харилцан үйлчлэлийг найдвартай илэрхийлж байгааг илтгэнэ. Загварын үр дүнгээс харахад, эрчимтэй хур тунадастай өдрүүдийн тоо (R95P) нь GPP-д статистикийн хувьд сул ба сөрөг нөлөөтэй (шууд нөлөөллийн коэффициент =  $-0.916$ ,  $P = 0.021$ ) байжээ. Энэ нь их хур тунадас нь хөрсний чийг ханах, хүчилтөрөгчийн дутагдал зэргээр дамжин ургамлын ургалтыг саатуулах боломжтой механизмыг илтгэж байна.

Бороо орсон өдрийн тоо (R20) нь GPP-д эерэг ба хүчтэй нөлөөтэй байсан (шууд нөлөөллийн коэффициент =  $1.455$ ,  $P < 0.001$ ). Энэ нь хур тунадасны тогтвортой, жигд хуваарилалт нь ургамлын өсөлтөд чухал нөхцөл болдгийг харуулж байна.

Харин жилийн дундаж хур тунадасны эрчим (SDII) болон температуртай холбоотой экстремаль индексүүд (SU, TNn, TNx) нь GPP-д шууд статистикийн ач холбогдол бүхий нөлөө үзүүлээгүй ( $P > 0.05$ ). Энэ нь эдгээр хүчин зүйлс нь шууд бус замаар, өөрөөр хэлбэл дам нөлөөгөөр ургамлын бүтээгдэхүүнд нөлөөлж байж болзошгүйг илтгэж байна.

Цаашдын дүн шинжилгээний үр дүн нь цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүдийн харилцан үйлчлэлийн механизмыг илүү тодорхой харуулсан. Эрчимтэй хур тунадастай өдрүүдийн хэмжээ (R95P) нь бороотой өдрийн тоо (R20)-г мэдэгдэхүйц нэмэгдүүлсэн (замын коэффициент =  $0.997$ ,  $P < 0.001$ ). Энэ нь хэт их хур тунадасны давтамж ихсэх тусам бороо орох өдрийн тоо мөн нэмэгдэх хандлагатай болохыг тусгаж байна.

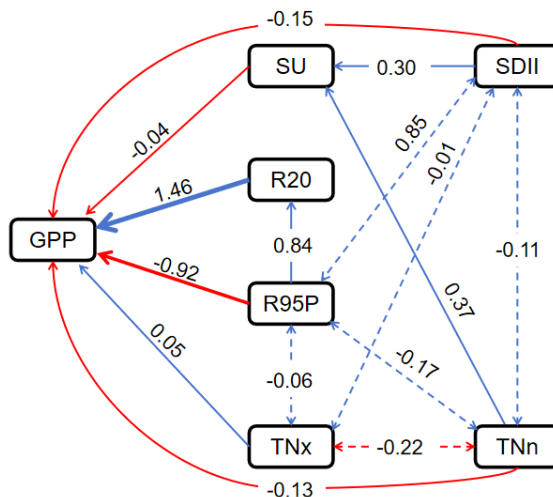
Хоногийн хамгийн бага температурын дээд утга (TNx) нь ууршилтыг хурдасгах эсвэл гангийн стрессийг нэмэгдүүлэх замаар R20-д сөргөөр нөлөөлөх магадлалтай (замын коэффициент =  $-0.356$ ,  $P = 0.003$ ). Үүнээс гадна, TNx нь зуны хэт халуун өдрүүдийн тоо (SU)-г ихээхэн нэмэгдүүлсэн (замын коэффициент =  $0.634$ ,  $P < 0.001$ ). Энэ нь өндөр температур нь улирлын уур амьсгалын хандлагад гүн гүнзгий нөлөөтэй болохыг тусгаж байна. Харин эсрэгээр, R95P нь SU-д статистикийн хувьд мэдэгдэхүйц сөрөг нөлөөтэй байсан (замын коэффициент =  $-0.623$ ,  $P = 0.026$ ). Энэ нь эрчимтэй хур тунадасны улмаас уур амьсгалын тогтолцооны тогтворгүй байдал нэмэгдэж, зуны хэт халуун өдрүүдийн тоо буурах хандлагатай байгааг илтгэж байна.

Цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүд нь ургамлын анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP)-ийн динамикт олон талт, төвөгтэй механизмаар нөлөөлдөг болох нь илэрч байна. R95P болон R20 нь GPP-д

хязгаарлах болон дэмжих хосолсон нөлөө үзүүлж байгаа нь нийт хур тунадасны хэмжээ болон түүний тархалтын хэв маяг нь ургамлын бүтээгдэхүүний гол хөшүүрэг болохыг харуулж байна.

Мөн TNx нь GPP-д шууд нөлөө үзүүлдэггүй ч зуны уур амьсгалын хэв шинж, хур тунадасны хэлбэлзэл зэрэг дам замаар GPP-д нөлөөлөх чухал параметр юм.

Энэхүү судалгаа нь экосистемийн үйл ажиллагаанд цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүдийн цогц харилцан нөлөөллийг илрүүлж, уур амьсгалын өөрчлөлтийн үед экосистемийн хариу үйлдлийг таамаглах, зохицуулах бодитой үндэслэл болдгоороо онцлог юм (Зураг 12).



Зураг 12. GPP болон цаг агаарын экстремаль индексүүдийн хооронд тогтоосон SEM анализ: (Цэнхэр сум: эерэг хамаарал, Улаан сум: сөрөг хамаарал, тоо: хамаарлын коэффициент)

### Хэлэлцүүлэг

Энэхүү судалгаагаар Монгол орны 2000–2023 оны ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүн (GPP)-ийн орон зайн ба цаг хугацааны өөрчлөлт, мөн экстремаль уур амьсгалын хүчин зүйлүүдийн GPP-д үзүүлэх нөлөөг үнэлсэн нь хуурай бүсийн экосистемийн нүүрстөрөгчийн эргэлтийн динамикийг илүү нарийвчлалтай ойлгоход хувь нэмэр оруулж байна. Судалгааны үр дүнгээс харахад Монгол орны жилийн дундаж GPP сүүлийн 24 жилийн хугацаанд өсөх хандлагатай байсан нь уур амьсгалын өөрчлөлтийн нөлөөнд экосистемийн хариу үйлдэл орон зай, цаг хугацаанаас хамаарч ялгаатай илэрч буйг харууллаа. Цаг уурын экстремаль индексүүдийн хувьд хур тунадасны давтамжийг илэрхийлдэг R20 индекс GPP-тэй хамгийн хүчтэй эерэг хамааралтай гарсан бол температурын SU ба TNx индексүүд сөрөг нөлөөтэй байв. Энэ нь Монгол орны хуурай газрын экосистем усны нөөцийн хүртээмжид өндөр мэдрэмтгий, эмзэг болохыг баталж байна.

GPP нэмэгдэх хандлага илүүтэй төв, зүүн болон хойд хэсэгт илүү тод илэрсэн нь тухайн бүсүүдэд чийгийн нөхцөл бусад бүс нутгуудтай харьцуулахад харьцангуй илүү таатай байдагтай холбоотой. Энэ нь Wang et al. (2020), Piao et al. (2019)-ийн хуурай бүсийн судалгааны дүнтэй нийцэж байгаа ба тэдний судалгаанд хур тунадасны бага хэмжээний өсөлт нь хуурай экосистемийн фотосинтезийг мэдэгдэхүйц идэвхжүүлдэг гэж дурдсан байдаг. Харин Монгол орны баруун бүс, говийн бүс нутгаар GPP буурах болон өсөлт сулрах чиг хандлага ажиглагдсан нь үндсэндээ хуурайшилтын эрчимжилт, хөрсний чийгийн дутагдал нэмэгдсэнтэй холбоотой (Sainbuyan et al., 2020). Эдгээр бүс нутагт хур тунадасны хэлбэлзэл өндөр, дундаж температур өсөж байгаа нь ууршилтыг нэмэгдүүлж, улмаар ургамлын ургалтыг хязгаарлаж байгааг харуулж байна.

Цаг агаарын экстремаль үзүүлэлтүүдийн хувьд R20 индекс GPP-д үзүүлэх хамгийн өндөр эерэг нөлөө илэрсэн нь онцлох ач холбогдолтой. R20 нь 20 мм-ээс дээш хур тунадас орсон өдрийн тоог илэрхийлэх ба ийм төрлийн тунадас нь хөрсний гүнний чийгийг бий болгож, ургамлын үндэсний системд усыг хүргэдэг (Zhang et al., 2016). Харин R95P болон SDII-ны эрчим нь хэдийгээр GPP-тэй эерэг хамааралтай ч, нөлөө нь сул гарсан нь хур тунадасны эрчим нэмэгдэхийн зэрэгцээ хөрс эвдрэх эрсдэл, урсац нэмэгдэх, хөрсний үржил шим алдагдах зэрэг сөрөг нөлөөтэй

холбоотой байж болох юм (Huang et al., 2021). Энэ нь Монгол орны бэлчээрийн хээрийн бүсийн хөрс нимгэн, салхины болон усны элэгдэлд өртөмтгий гэдгээр тайлбарлагдаж болно.

Температурын экстремаль үзүүлэлтүүдийн хувьд SU болон TNx нь GPP дээр сөрөг нөлөөтэй байв. Энэ нь Монгол орны хуурай бүс нутгаар зун халалтын стресс нэмэгдсэнээс үүдэлтэй фотосинтези буурах, ургамлын амьсгалын эрчим нэмэгдэх зэрэг физиологийн өөрчлөлттэй холбоотой (Reichstein et al., 2013). Ууршилт нэмэгдэхийн зэрэгцээ өндөр температур нь ургамлын эсийн бүтэц, ферментийн идэвхэд сөргөөр нөлөөлдөг нь судалгаагаар нотлогдсон байдаг (Wu et al., 2014; Zhang et al., 2016). Харин TNn индекс GPP-д сул эерэг хамааралтай байсан нь бага температур нь стрессийг бууруулж хөрсний микробиологийн идэвхийг нэмэгдүүлж, улирлын нөхцлөөс хамаарч заримдаа ургамлын өсөлтийг дэмжиж байна.

SEM-ийн үр дүнгээс харахад цаг уурын экстремаль үзүүлэлтүүд GPP-д шууд болон шууд бус нөлөөлөл үзүүлж буйг баталлаа. R20 болон R95P-ийн нөлөөллийн ялгаа нь хур тунадасны хэмжээ бус тархалтын хэв шинж ургамлын өсөлтөд илүү чухал болохыг харуулж байна. Энэ нь хур тунадасны давтамж нь ургамлын өсөлтөд эерэг нөлөөтэй байхад, хур тунадасны хэт их хэмжээ нь хөрсний агааржуулалт, үндэсний амьсгалыг системийн саарулж, GPP-ийг бууруулж байна. Үүнтэй холбоотойгоор хуурай бүсийн экосистемийн уур амьсгалын эмзэг байдлын индексийг боловсруулахад тунадасны давтамжийг заавал тооцох шаардлагатайг энэхүү судалгаа илтгэж байна.

Энэхүү судалгаагаар Монгол орны хээрийн болон говийн экосистем нүүрстөрөгчийн эргэлтийн нэг чухал бүрэлдэхүүн болж буйг онцлон харуулж байна. Бэлчээрийн ургамлын биомассын өөрчлөлт нь зөвхөн экосистемийн үйл ажиллагаанд бус мал аж ахуйн үйлдвэрлэлийн үндсэн эх үүсвэр болсон бэлчээрийн даац, малын тэжээлийн нөөцөд шууд нөлөөлдөг. Байгаль орчны өөрчлөлтийн улмаас GPP буурч буй бүс нутагт бэлчээрийн даац хэтрэлт, хөрсний доройтол эрчимжих эрсдэлтэй (Hilker et al., 2014). Иймд судалгааны практик ач холбогдол нь GPP-ийн цаг уурын эрс тэс нөхцөлд үзүүлэх хариу үйлдлийг үнэлэх замаар бэлчээрийн тогтвортой менежмент, уур амьсгалд дасан зохицох бодлогын үндэслэл боловсруулахад хэрэгцээтэй юм. Гэсэн ч энэхүү судалгаанд тодорхой хязгаарлалтууд байна. Нэгдүгээрт, GPP-ийн тооцоход ашигласан MODIS мэдээлэл 500 м-ийн нарийвчлалтай учир жижиг талбайн нарийвчилсан мэдээлэл хангалттай тусгагдаагүй байж болно. Хоёрдугаарт, газар ашиглалтын өөрчлөлт, бэлчээрийн даац, хөрсний шинж чанарын ялгаа зэрэг нөлөөлөгч хүчин зүйлсийг шинжилгээнд тусгаагүй. Гуравдугаарт, зөвхөн 6 төрлийн цаг агаарын экстремаль индекс ашигласан нь уур амьсгалын өндөр нарийвчлалтай динамикийг бүрэн тайлбарлах боломжийг хязгаарлаж байна.

Цаашдын судалгаанд өндөр нарийвчлалтай хиймэл дагуулын өгөгдөл ашиглаж GPP-ийн нарийвчлалыг сайжруулах, мөн газар дээрх ургамлын биомассын хэмжилттэй уялдуулан баталгаажуулах шаардлагатай. Мөн газар ашиглалт, бэлчээрийн даац, хөрсний чийгийн өөрчлөлт, уур амьсгалын олон хувьсагчийн нийлмэл нөлөөг машин сургалтын аргачлалыг ашиглан загварчлах нь энэ чиглэлийн судалгааг илүү гүнзгий болгоно. Үүнээс гадна уур амьсгалын ирээдүйн нөхцөлд GPP-ийн өөрчлөлтийг таамаглах уур амьсгалын сценарийн шинжилгээ хийх шаардлагатай байна.

## Дүгнэлт

Судалгаанд Монгол орны 2000-2023 оны хоногийн хамгийн их температур, хамгийн бага температур, хур тунадасны хоногийн мэдээ болон ургамлын нийт анхдагч бүтээгдэхүүний (GPP) өгөгдөлд үндэслэн урт хугацааны GPP-ийн орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлтийн төлөв байдал, цаг агаарын экстремаль өөрчлөлтөд үзүүлэх хариу үйлдэл чиг хандлагын шинжилгээний аргууд ашиглан шинжлэв.

Монгол орны ургамлын GPP-ын орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлт: Монгол улсын жилийн дундаж GPP 2000-2023 он хүртэл  $1.40 \text{ гC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{а}^{-1}$ -ээр өссөн байна. Баруун урдаас зүүн хойд зүгт ургамлын GPP нэмэгдэж, төв болон зүүн хойд хэсэгт илүү тодорхой өсөлт ажиглагдав.

Цаг агаарын экстремаль үзэгдлийн орон зай, цаг хугацааны өөрчлөлт: Экстремаль тунадасны индексүүд болон температурын үзүүлэлтүүдийн хандлага өссөн, түүний дотор чийг ихтэй өдрүүдийн тоо (R95p) болон бороо ихтэй өдрийн тоо (R20) өссөн бөгөөд температурын индексүүдийн хандлага мэдэгдэхүйц өөрчлөгдсөн.

Цаг агаарын экстремаль индексүүдийн GPP-тэй харилцан хамаарал: Экстремаль хур тунадасны үзэгдлүүд (R20, R95P, SDII) нь ургамлын өсөлтийг дэмжиж, харин температурын экстремаль үзэгдлүүд (TNn, TNx, SU) нь GPP-д сул нөлөөтэй байлаа. Гэвч зарим бүс нутгуудад (Завхан аймаг) экстремаль хур тунадас нь GPP-ийг бууруулах нөлөөтэй байна.

Бүтцийн тэгшитгэлийн загварчлал (SEM) нь хур тунадас болон экстремаль температурын үзэгдлүүд нь ургамлын GPP-тэй хамааралтай бөгөөд хур тунадасны төрөл, эрчмийн тархалт ургамлын өсөлтийг шууд болон шууд бус байдлаар зохицуулдаг.

Энэхүү судалгаа нь цаг агаарын экстремаль үзэгдлүүд болон экосистемийн хариу үйлдлийг ойлгоход чухал үүрэг гүйцэтгэж, Монгол орны хуурай бүс нутгуудад цаг агаарын экстремаль нөхцөлд дасан зохицох менежментийн стратеги боловсруулахад шинжлэх ухааны үндэслэл болох боломжтой.

## Ном зүй

1. Батсүрэн, Д., Алтанболд, Э., Сандэлгэр, Д., Дорлигжав, Д., Болдбаяр, Р., & Одхүү, Н. (2020). Нутаг дэвсгэрийн нэгжийн хил ба газарзүйн элемент хоорондын уялдаа. *Geographical Issues*, 20(1), 4-17.
2. Доржготов, Д. (ред). (2022). *Монгол орны байгалийн бүс, бүслүүрийн 1: 5000 000 масштабын зураг, Монгол Улсын Үндэсний атлас, ШУА-ийн Газарзүй-Геоэкологийн хүрээлэн, Улаанбаатар хот*, 58-59
3. Мөнхбат, Б., Гомболүүдэв, П., Эрдэнэсүх, С., & Сандэлгэр, Д. (2022). ANUSPLIN статистик загвар ашиглан Монгол орны агаарын температур, хур тунадасыг (1991-2020) өндөр нарийвчлалтай торын зангилааны цэгээр тооцоолох нь: To estimate air temperature and precipitation of Mongolia (1991-2020) for the high-resolution grid using ANUSPLIN statistical model. *Geographical Issues*, 22(1), 92–102.
4. Нацагдорж, Л., Хауленбек, А. (2012). Монгол орны ойн экосистемд уур амьсгалын өөрчлөлтийн нөлөөллийн үр дагаварыг үнэлэх асуудал, *Монгол орны геоэкологийн асуудал*, No9, 34-58
5. Цэгмид, Ш. (1969). *Монгол орны физик газарзүй* Улаанбаатар хот, Улсын хэвлэлийн газар, 3-7.
6. AghaKouchak, Amir, Cheng, Linyin, Mazdidasni, Omid, Farahmand, Alireza. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought(J). *ProQuest*, 2014,41(24).
7. Ahlström A, Raupach M R, Schurgers G, et al. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO2 sink(J). *Science*. 2015, 348(6237): 895-899.
8. Akritas, M. G., Murphy, S. A., & LaValley, M. P. (1995). The Theil-Sen Estimator with Doubly Censored Data and Applications to Astronomy. *Journal of the American Statistical Association*, 90(429), 170–177.
9. Asadnabizadeh M. *Climate Change 2023 Synthesis Report*, A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (M). 2023.
10. Bao, G., Bao, Y., Sanjjava, A., Qin, Z., Zhou, Y., & Xu, G. (2015). NDVI-indicated long-term vegetation dynamics in Mongolia and their response to climate change at biome scale. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4293-4306.
11. Bayarsaikhan, S., Mandakh, U., Dorjsuren, A., Batsaikhan, B., Bao, Y., Adiya, Z., & Myagmartseren, P. (2020). Variations of vegetation net primary productivity and its responses to climate change from 1982 to 2015 in Mongolia. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 347-353.

12. Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rodenbeck C, Arain M A, Baldocchi D, and Bonan G B, 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, 329(5993): 834-838.
13. Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., ... & Papale, D. (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, 329(5993), 834-838.
14. Bilguun, T., Batsuren, D., Otgonbayar, D., & Bayarmaa, M. (2023). Modern dynamics of Tsambagarav mountain glaciers and interrelationships of hydrological systems, Mongol Altay Mountain, Western Mongolia: Монгол Алтайн Цамбагарав уулын мөстлийн орчин үеийн динамик, ус зүйн системийн харилцан хамаарал. *Geographical Issues*, 23(01), 50-68.
15. Borkhuu, B., Bumtsend, M. T., Ulzii-Orshikh, M. D., Sumiya, E., Dorligjav, S., Dugerjav, M. O., ... & Batsaikhan, N. (2023). *Second Biennial Update Report (BUR2) to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*. The Second BUR has been prepared in accordance with the UNFCCC Biennial Update Report guidelines for Parties not included in Annex 1 to the Convention.
16. Chen, S., Huang, Y., Gao, S., & Wang, G. (2019). Impact of physiological and phenological change on carbon uptake on the Tibetan Plateau revealed through GPP estimation based on spaceborne solar-induced fluorescence. *Science of the Total Environment*, 663, 45-59.
17. Chen, X., Tao, X., & Yang, Y. (2022). Distribution and attribution of gross primary productivity increase over the Mongolian plateau, 2001-2018. *Ieee Access*, 10, 25125-25134.
18. Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., ... & Valentini, R. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437(7058), 529-533.
19. Dagvadorj, D., Natsagdorj, L., Dorjpurev, J., & Namkhainyam, B. (Eds.). (2009). *Mongolia: Assessment Report on Climate Change 2009*. Ministry of Environment, Nature and Tourism, UNDP.
20. Dingjun, L., Altanbold, E., Batsuren, D., Tuvshin, G., Yumchmaa, G., Boldbayar, R., & Gansukh, Y. (2023). Changes in the area of lakes in different natural regions of Mongolia and climate effect: Монгол орны байгалийн янз бүрийн бүсүүд дэх нууруудын талбайн өөрчлөлт ба уур амьсгалын нөлөө. *Geographical Issues*, 23(01), 4-21.
21. Doljin, D., & Yembuu, B. (2021). Division of the physiographic and natural regions in Mongolia. In *The physical geography of Mongolia* (pp. 177-193). Cham: Springer International Publishing.
22. Dorjsuren, B., Yan, D., Wang, H., Chonokhuu, S., Enkhbold, A., Davaasuren, D., ... & Gedefaw, M. (2018). Observed trends of climate and land cover changes in Lake Baikal basin. *Environmental Earth Sciences*, 77(20), 725.
23. Dorjsuren, B., Zemtsov, V. A., Batsaikhan, N., Demberel, O., Yan, D., Hongfei, Z., ... & Siyu, W. (2024). Trend analysis of hydro-climatic variables in the Great Lakes Depression region of Mongolia. *Journal of Water and Climate Change*, 15(3), 940-957.
24. Enkhbold, A., Dingjun, L., Ganbold, B., Yadamsuren, G., Tsasanchimeg, B., Dorligjav, S., ... & Boldbayar, R. (2024). Changes in morphometric parameters of lakes in different ecological zones of Mongolia: implications of climate change. *Climate Research*, 92, 79-95.
25. Erdenejargal, N., Dorjsuren, B., Choijinjav, L., Doljin, D., Enkhbold, A., Munkhuu, B., ... & Girma, A. (2021). Evaluation of the natural landscape aesthetic: a case study of Uvs province, Mongolia. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(5), 4497-4509.
26. Fan, Y., Chen, J., Shirkey, G., John, R., Wu, S. R., Park, H., & Shao, C. (2016). Applications of structural equation modeling (SEM) in ecological studies: an updated review. *Ecological processes*, 5(1), 19.
27. Field, C. B., Randerson, J. T., & Malmström, C. M. (1995). Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 51(1), 74-88.

28. Gajewski K. (2015). Impact of Holocene climate variability on Arctic vegetation. *Global and Planetary Change*, 133: 272–287.
29. Ge Wy, Han Jq, Zhang D, Wang F (2021). Divergent impacts of droughts on vegetation phenology and productivity in the Yungui Plateau, southwest China. *Ecological Indicators*, 127, 107743.
30. Hao, J., Lin, Q., Wu, T., Chen, J., Li, W., Wu, X., Hu, G., & La, Y. (2023). Spatial–Temporal and Driving Factors of Land Use/Cover Change in Mongolia from 1990 to 2021. *Remote Sensing*, 15(7), 1813.
31. Horton D E, Johnson N C, Singh D, et al. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends(J). *Nature*, 2015, 522(7557): 465–469.
32. Hui, D., Deng, Q., Tian, H., & Luo, Y. (2022). *Global climate change and greenhouse gases emissions in terrestrial ecosystems*. In Handbook of climate change mitigation and adaptation (pp. 23-76). Cham: Springer International Publishing.
33. Karpouzios, D. K., Kavalieratou, S., & Babajimopoulos, C. (2010). Trend analysis of precipitation data in Pieria Region (Greece). *European Water*, 30(30), 30-40.
34. La Sorte, F. A., Johnston, A., & Ault, T. R. (2021). Global trends in the frequency and duration of temperature extremes. *Climatic Change*, 166(1).
35. Lloret F, Escudero A, Iriondo J M, et al. Extreme climatic events and vegetation: the role of stabilizing processes(J). *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 797-805.
36. Magsar, A., Matsumoto, T., Enkhbold, A., & Nyam-Osor, N. (2021). Application of remote sensing and GIS techniques for the analysis of lake water fluctuations: a case study of ugii lake, Mongolia. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(5), 2051-2059.
37. Muqier, M., Sainbuyan, B., ZhenJiang, M., Battsengel, V., Byambakhuu, G., Munkh-Erdene, J., ... & Batsaikhan, B. (2025). Impact of extreme climate events on spring vegetation phenology of Mongolia: Монгол орны ургамлын хаврын фенологид уур амьсгалын онцгой үзэгдлийн үзүүлэх нөлөө. *Geographical Issues*, 25(01), 15-38.
38. Nyamaa, T., Sainbuyan, B., Narantsatsral, T., Lan, A., Urtnasan, M., Baoyin, T., ... & Munkh-Erdene, J. (2024). The influence of socio-economic factors on net primary products of Mongolia during 2000-2021: Монгол орны ургамлын цэвэр анхдагч бүтээгдэхүүнд нийгэм эдийн засгийн хүчин зүйлсийн нөлөө (2000-2021). *Geographical Issues*, 24(01), 63-76.
39. Qin, D. H. (2014). Climate change science and sustainable development. *Progress in Geography*, 33(7), 874-883.
40. Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M.D., Seneviratne, S.I., Zscheischler, J., Beer, C., Buchmann, N., Frank, D., 2013. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature* 500, 287–295.
41. Tong, S., Zhang, J., Bao, Y., Lai, Q., Lian, X., Li, N., & Bao, Y. (2018). Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982–2013. *Journal of Geographical Sciences*, 28(5), 595-610.
42. Struck, J., Bliedtner, M., Strobel, P., Taylor, W., Biskop, S., Plessen, B., ... & Zech, R. (2022). Central Mongolian Lake sediments reveal new insights on climate change and equestrian empires in the Eastern Steppes. *Scientific reports*, 12(1), 2829.
43. Sumiya, E., Dorjsuren, B., Yan, D., Dorligjav, S., Wang, H., Enkhbold, A., ... & Girma, A. (2020). Changes in water surface area of the lake in the Steppe Region of Mongolia: A case study of Ugii Nuur Lake, Central Mongolia. *Water*, 12(5), 1470.
44. Tang R, He B, Chen H W, et al. increasing terrestrial ecosystem carbon release in response to autumn cooling and warming (J). *Nature Climate Change*, 2022, 12(4):380-385.
45. Wang Miaomiao, Zhou Lei, Wang Shaoqiang, Wang Xiaoqin, Sun Leigang. An analysis of the Gross Primary Productivity simulation difference resulting from the spatial resolution(J). *Geographical Research*, 2016, 35(4): 617-626.

46. Wang, X., Chen, J. M., & Ju, W. (2020). Photochemical reflectance index (PRI) can be used to improve the relationship between gross primary productivity (GPP) and sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF). *Remote Sensing of Environment*, 246, 111888.
47. Wu, J. D., Fu, Y., Zhang, J., & Li, N. (2014). Meteorological disaster trend analysis in China: 1949-2013. *Journal of Natural Resources*, 29(9), 1520-1530.
48. Wu X, Zhang R, Bento VA, Leng S, Qi J, Zeng J, Wang Q (2022). The effect of drought on vegetation gross primary productivity under different vegetation types across China from 2001 to 2020. *Remote Sensing*, 14, 4658.
49. Yan Min, Li Zeng-Yuan, Tian Xin, Chen Er-Xue, Gu Cheng-Yan. Remote sensing estimation of gross primary productivity and its response to climate change in the upstream Heihe River Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(1): 1-12.
50. Yu, F., Price, K. P., Ellis, J., Feddema, J. J., & Shi, P. (2004). Interannual variations of the grassland boundaries bordering the eastern edges of the Gobi Desert in central Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 25(2), 327-346.
51. Zhang, Y., Xiao, X., Zhou, S., Ciais, P., McCarthy, H., & Luo, Y. (2016). Canopy and physiological controls of GPP during drought and heat wave. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3325-3333.