



С, N, P-ын эргэлтэд оролцдог хөрсний энзимийн идэвхийг уур амьсгалын градиентын дагуу судалсан үр дүн

Батсайхан Хишигмаа^{1,2} , Хандаа Оюухан¹ , Жамбалсүрэн Баярмаа² ,
Шагдар Эрдэнэчимэг¹ , Эрдэнэбилэг Энхмаа³ , Дашням Пунсалдулам^{1*} 

¹Монгол улс, Улаанбаатар, Шинжлэх ухааны академи, Биологийн хүрээлэн, Микробын нийлэгжлийн лаборатори

²Монгол Улс, Улаанбаатар, Монгол Улсын Их сургуулийн Шинжлэх Ухааны Сургуулийн Биологийн тэнхим, Биохимийн лаборатори

³Монгол улс, Улаанбаатар, Шинжлэх ухааны академи, Ботаникийн цэцэрлэгт хүрээлэн, Ургамалжлын экологи, ургамлын эдийн засгийн лаборатори

*Холбоо барих зохиогч: punsaldulam_d@mas.ac.mn <https://orcid.org/0000-0003-1086-397X>

Хураангуй. Хөрсний энзим нь хөрсний бичил биетний үйл ажиллагаа, шим тэжээлийн нэгдлийн эргэлтийн чухал индикатор байхаас гадна хөрсний органик нэгдлийн задралын төлвийг илтгэдэг. Хөрсний энзим нь уур амьсгалын нөлөөнд мэдрэг тул уур амьсгал өөрчлөгдөхөд органик нэгдлүүдийн задралд хэрхэн нөлөөлөхийг судлах боломж олгодог. Энэ зорилгоор бид хур тунадас болон температурын ялгаатай 26 цэгээс, хөрсний хоёр өөр гүн (0–15 см болон 15–30 см)-ээс цуглуулсан дээжид нүүрстөрөгч (C), азот (N), фосфор (P)-ын эргэлтэд оролцдог дөрвөн энзимийн идэвхийг судлав. Судалгаагаар C болон P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх ($1.9\text{--}561.4$ ба $25.4\text{--}536.3$ нмоль г^{-1} ц^{-1}), N-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх ($6.07\text{--}146.2$ нмоль г^{-1} ц^{-1})-ээс харьцангуй өндөр, хөрсний 0–15 см гүнд идэвх нь нэмэгдэж байна. Хөрсний хоёр гүний аль алинд нь C, P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх олон жилийн дундаж хур тунадас (цаашид хур тунадас гэх)-тай эерэг (Пирсон $r = 0.76; 0.95$) харин олон жилийн дундаж температур (цаашид температур гэх)-тай сөрөг хамааралтай ($r = -0.65; -0.61$) байгаа зүй тогтол илрэв. N-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвхийн хувьд хөрсний 0–15 см-ийн гүнд дээрхтэй ижил зүй тогтол тодорхойлогдсон бол 15–30 см-ийн гүнд уур амьсгалын нөлөө илрээгүй. Харин хөрсний органик нэгдэл, нийт азот нь бүх энзимийн идэвхтэй эерэг ($r = 0.41\text{--}0.93$) хамааралтай байна. Уур амьсгал, хөрсний органик нэгдэл энзимийн идэвхэд нөлөөлж байгаа боловч 0–15 см-ийн гүнд температур, 15–30 см-ийн гүнд хур тунадасны нөлөө харьцангуй өндөр байгаа үр дүн гарлаа. Эдгээр үр дүнгээс харахад температур болон хур тунадасны өөрчлөлт нь Монгол орны хувьд органик нэгдлээр баялаг бүсийн хөрсний органик нэгдлийн нөөцөд (ялангуяа өнгөн хөрсний өнгөн давхаргад) сөргөөр нөлөөлж болзошгүй байна.

Түлхүүр үг: β -глюкозидаза, хүчиллэг фосфатаза, лейцин аминопептидаза, N-ацетилглюкозаминидаза, хөрсний энзим

Хүлээн авсан 2024.10.04; хянан тохиолдуулсан 2024.12.02; зөвшөөрсөн 2024.12.30

© 2024 Зохиогч(д). [CC BY-NC 4.0 лиценз](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Оршил

Хөрсний бичил биетэн нь хөрсний органик нэгдлийн задралд чухал үүрэгтэй төрөл бүрийн энзимүүдийг ялгаруулдаг [1], [2]. Ингэснээр хөрсний органик нэгдлийг задлан өсөлт, бодисын солилцоондоо шаардлагатай энерги, шим тэжээлийн нэгдлээр хангана. Иймээс эдгээр энзим хөрсний шим тэжээл, органик нэгдлийн эргэлтэд чухал үүрэгтэй оролцдог [3]. Хөрсөнд элбэг тохиолддог, нүүрстөрөгч (C), азот (N), фосфор (P) бүхий полимер нэгдлийн задралд оролцдог энзимүүдээс түгээмэл судлагддаг

нь C-ийн эргэлтэд оролцдог β -глюкозидаза, N-ын эргэлтэд оролцдог лейцин аминопептидаза болон N-ацетилглюкозаминидаза, P-ын эргэлтэд оролцдог хүчиллэг фосфатаза юм [4], [5]. Эдгээр энзимийн үйлчлэлээр полимер нэгдлүүд задран бичил биетэн, бусад организм ашиглах боломжтой энгийн нэгдлүүд үүснэ. Жишээлбэл, фосфатаза нь фосфорын комплексыг задалж хөрсөнд фосфорын уусдаг хэлбэрийг үүсгэснээр ургамалд ашиглагдах боломжийг нэмэгдүүлнэ [3], [6].

Уур амьсгалын хүчин зүйлс, ялангуяа температур

болон хур тунадас нь хөрсний органик нэгдлийн динамикт чухал үүрэгтэй. Тухайлбал, хур тунадас хязгаарлагдмал бүс нутагт экосистемийн анхдагч бүтээмж нь чийгээр хязгаарлагддаг. Чийглэг нөхцөл нь органик нэгдэл үүсэх, тогтворжиход тохиромжтой бол өндөр температур нь органик нэгдэл бичил биетнээр задрах процессыг нэмэгдүүлдэг [7]. Уур амьсгалын өөрчлөлт нь хур тунадас буух зүй тогтлыг өөрчлөн (хэт хуурай, чийглэг үетэй болох) энзимийн идэвхэд нөлөөлснөөр хөрсний органик нэгдлийн задралд нөлөөлөх боломжтой хэмээн олон судлаачид үзсэн [8], [9], [10]. Хур тунадасны горимыг өөрчлөх туршилтаар хөрсний энзимийн идэвхэд гарах өөрчлөлт, шим тэжээлийн нэгдлийн хүртээмж болон биогехимийн эргэлтэд нөлөөлж байгааг тогтоосон [11]. Иймээс, хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн C, N, P-ын хэрэгцээг хангахад чухал үүрэгтэй хөрсний энзимийн идэвхийг уур амьсгал болон хөрсний хүчин зүйлсийн ялгаатай нөхцөлд судлах нь органик нэгдлийн задралд уур амьсгалын өөрчлөлтийн үзүүлэх нөлөөг тогтоох, ойлгоход чухал ач холбогдолтой юм.

Манай орны судлаачид улаан буудай, рапсын тариалангийн талбайн хөрсөнд C, N, P-ын эргэлтэд оролцдог хэд хэдэн энзимийн идэвхийг судалсан [12]. Хөрсний энзимийн идэвхэд уур амьсгал болон хөрсний шинж чанар хэрхэн нөлөөлдөг талаар дэлхий даяар ихээр судалж байгаа боловч Монгол орны хувьд энэ талын судалгаа ховор байна.

Энэхүү судалгаагаар бид C, N, P-ын эргэлтэд оролцдог дөрвөн энзимийн идэвхэд уур амьсгал болон хөрсний хүчин зүйлс хэрхэн нөлөөлж байгааг судлахыг зорилоо. Хөрсний өөр өөр гүнд органик нэгдлийн чанар, хөрсний шинж чанар, бичил биетний олон янз байдал ялгаатай байдаг [13] учир бид хөрсний энзимийн идэвхийг хөрсний хоёр өөр гүнд тодорхойллоо. Хөрсний энзимийн идэвх нь органик нэгдлийн задралын төлвийг илтгэдэг тул [6] бидний судалгаа Монгол орны уур амьсгалын ялгаатай нөхцөл бүхий цэгүүдэд органик нэгдлийн задралын төлвийг тодруулахад чухал мэдээллийг бий болгоно.

Материал, арга зүй

Хөрсний дээж цуглуулсан загвар, цэгүүд

Хөрсний дээжийг 2022 оны 06 сард уур амьсгалын ялгаатай нөхцөл бүхий 26 цэгээс цуглуулсан ба эдгээрээс 8 нь ойт хээр, 9 нь хээр, 9 нь цөлөрхөг хээр ба цөлийн бүсэд хамаарч байсан (1-р зураг). Цэгүүдийн олон жилийн дундаж хур тунадас 44 мм-ээс 353 мм

хүртэл, харин олон жилийн дундаж температур -5.96°C -ээс 5.78°C байсан.

Дээжийг дугтуйн аргаар цуглуулсан ба цэг тус бүрт 100 м^2 талбай байгуулж, талбайн дотор нь 1 м^2 хэмжээтэй таван дэд талбайг сонгож төвөөс болон дөрвөн булангаас дээж авч, 0–15 см болон 15–30 см хоёр өөр гүнд хуваасан. Нэг нийлмэл дээж үүсгэхийн тулд дэд талбай бүрээс авсан таван дээжийг хольсон [13]. Дээжийг -80°C -д хадгалж, туршилт хийхээс өмнө 2 мм-ийн шигшүүрээр шигшиж бэлдсэн.

Уур амьсгалын мэдээлэл, хөрсний физик-химийн шинж чанар

WorldClim v2.1, <https://www.worldclim.org/> сайтаас дээж цуглуулсан цэгүүдийн хур тунадас, температурын мэдээллийг (2012–2021) авсан. Хөрсний чийгийг 105°C -д хатааж, органик нэгдлийн агууламжийг хатаасан хуурай хөрсийг 550°C -т шатааж үлдэгдлийг хэмжих жингийн аргаар тодорхойлсон [14]. Хөрсний pH-ийг хөрс болон 0.1 M CaCl_2 -ын 1:5 харьцаатай суспензэд потенциометрийн аргаар, нийт азотыг Кьельдалийн аргаар [15], хөдөлгөөнт фосфорыг Мачигиний аргаар [16] тус тус тодорхойлсон.

Хөрсний энзимийн идэвх тодорхойлох

C-ийн эргэлтэд оролцдог β -глюкозидаза (β -glucosidase (BG)), N-ын эргэлтэд оролцдог лейцин аминопептидаза (leucine aminopeptidase (LAP)) ба N-ацетилглюкозаминидаза (N-acetylglucosaminidase (NAG)), болон P-ын эргэлтэд оролцдог хүчиллэг фосфатаза (acid phosphatase (AP)) энзимийн идэвхийг Jackson нар (2013)-ын протоколын дагуу колориметрийн аргаар тодорхойлсон [17]. Ингэхдээ *p*-нитрофенил ба *p*-нитроанилиний бүлэг бүхий хромоген субстратуудыг ашигласан. Энзимийн идэвхийг 1 гр хуурай хөрсөн дэх энзимийн нэг цагт үүсгэж буй бүтээгдэхүүний хэмжээгээр (нмоль $\text{г}^{-1}\text{ц}^{-1}$) илэрхийлсэн.

Статистик анализ

Статистик анализыг R программ (Version 4.2.1) ашиглан гүйцэтгэв. Дээж цуглуулсан цэгүүд болон гүнээс хамаарсан энзимийн идэвхийн ялгааг two-way ANOVA, энзимийн идэвх, хөрс болон уур амьсгалын хүчин зүйлс хоорондын хамаарлыг Пирсон корреляцийн аргыг ашиглан шалгасан. Уур амьсгал болон хөрсний хүчин зүйлсийн энзимийн идэвхэд үзүүлэх нөлөөг шугаман регресс, хүчин зүйл тус бүрийн харьцангуй нөлөөг hierarchical variation

partition анализ ашиглан шалгасан. Графикуудыг R (Version 4.2.1) болон GraphPad Prism 10.0 (GraphPad Software, Inc) ашиглан байгуулсан.

Судалгааны үр дүн

Хөрсний хоёр гүн дэх энзимийн идэвх

С-ийн эргэлтэд оролцдог BG, N-ын эргэлтэд оролцдог LAP ба NAG, P-ын эргэлтэд оролцдог AP энзимийн идэвхийг тодорхойлоход эдгээр энзимийн идэвх дээж цуглуулсан цэг болон гүнээс хамаарч ялгаатай байв (2-р зураг; 1-р хүснэгт). Дээж цуглуулсан цэгүүдтэй харьцуулахад хөрсний гүнээс хамаарсан ялгаа бага байна (1-р хүснэгт).

2-р зурагт харуулснаар NAG болон LAP-ийн нийлбэр идэвхтэй харьцуулахад BG болон AP-ын идэвх харьцангуй өндөр байна. Ихэнх тохиолдолд, 0–15 см-ийн гүнээс цуглуулсан дээжид 15–30 см-ийн гүнээс цуглуулсан дээжтэй харьцуулахад энзимийн идэвх илүү өндөр байна.

Хөрсний энзимийн идэвх ба хүрээлэн буй орчны хүчин зүйлсийн хамаарал

Корреляцийн анализаар энзимийн идэвх уур амьсгал, хөрсний шинж чанартай мэдэгдэхүйц хамааралтай болох нь илэрсэн (3-р зураг). Хур тунадас нь BG болон AP -ын идэвхтэй хөрсний хоёр гүнд аль алинд нь эерэг хамааралтай байна (3-р зураг; 4А, В-р зураг). Харин NAG+LAP -ын идэвхийн хувьд энэ хамаарал зөвхөн 0–15 см-ийн гүнд илэрч байна (3-р зураг; 4Б-р зураг). Хур тунадасны нөлөө AP энзимд хамгийн хүчтэй ($R^2=0.90$) харин NAG+LAP энзимийн хувьд сул ($R^2=0.27$ ба 0.09) байна (4Б, В-р зураг).

Температур нь хөрсний хоёр гүнд BG болон AP энзимийн идэвхтэй эерэг хамааралтай байгаа бол NAG+LAP-ын хувьд температурын нөлөө хөрсний 0–15 см-ийн гүнд ач холбогдолтой байгаа үр дүн гарлаа (3-р зураг). Шугаман регрессийн үр дүнгээс үзвэл, температур болон энзимийн идэвх хоорондын хамаарал нь хур тунадас болон энзимийн идэвх хоорондын хамааралтай харьцуулахад сул байгааг хөрсний 0–15 см-ийн гүнд R^2 утга 0.2–0.42, 15–30 см-ийн гүнд 0.14–0.31 хооронд хэлбэлзэж байгаагаас харж болно. Мөн, температур ба энзимийн идэвх хоорондын хамаарал 0–15 см-ийн гүнд (15–30 см-ийн гүнтэй харьцуулахад) харьцангуй өндөр байна (4Г-Е-р зураг).

Хөрсний pH 0–15 см-ийн гүнд BG, харин хөрсний хоёр гүнд AP -ын идэвхэд сөргөөр нөлөөлж байна.

Хөрсний хөдөлгөөнт фосфор нь 0–15 см-ийн гүнд AP-ын идэвхтэй эерэг хамааралтай байгаа бол бусад тохиолдолд энзимийн идэвхтэй мэдэгдэхүйц хамаарал үзүүлээгүй. Харин хөрсний хоёр гүнд энзимийн идэвх болон хөрсний чийг, органик нэгдэл, нийт азотын хооронд эерэг хамаарал илэрлээ (3-р зураг).

Органик нэгдэл ба хур тунадасны BG-ын идэвхэд үзүүлэх нөлөө 0–15 см-ийн гүнд ойролцоо (R^2 утгууд 0.60 ба 0.58) байсан бол 15–30 см-ийн гүнд органик нэгдлийн нөлөө хур тунадастай харьцуулахад илүү хүчтэй илэрч байна (4А, Ё-р зураг). Органик нэгдлийн нөлөө 0–15 см-ийн гүнд NAG+LAP -ын идэвхэд хамгийн их ($R^2=0.87$), харин 15–30 см-ийн гүнд мөн NAG+LAP -ын идэвхэд хамгийн бага нөлөө үзүүлсэн ($R^2=0.37$) (4Ж-р зураг).

Температур, хур тунадас, хөрсний pH, органик нэгдлийн хөрсний энзимийн идэвхэд үзүүлэх харьцангуй нөлөөг variation partition анализаар шалгахад хөрсний pH ба органик нэгдэлтэй харьцуулахад уур амьсгал нь энзимийн идэвхэд илүү нөлөөтэй байна. Тодруулбал, температурын харьцангуй нөлөө хөрсний 0–15 см-ийн гүнд хамгийн их байсан бол хур тунадасны харьцангуй нөлөө хөрсний 15–30 см-ийн гүнд хамгийн их байна (5-р зураг).

Хэлэлцүүлэг

Бидний судалгааны үр дүн Монгол орны уур амьсгал, хөрсний үржил шимээр ялгаатай цэгүүдийн хөрсний энзимийн идэвхэд хур тунадас болон температур ихээхэн нөлөөлж байгааг харууллаа. Түүнчлэн энзимийн идэвхэд уур амьсгалын үзүүлэх нөлөө хөрсний гүнээс хамаарч ялгаатай байгаа бөгөөд температурын харьцангуй нөлөө 0–15 см-ийн гүнд, харин хур тунадасны харьцангуй нөлөө 15–30 см-ийн гүнд өндөр байв.

Хөрсний энзимийн идэвх уур амьсгалаас гадна хөрсний шим тэжээлийн нэгдлийн агууламжтай холбоотой байдаг [18]. Стехиометрийн онол ёсоор бичил биетний бүлгэмдэл хэрэгцээт элементийг ашиглахын тулд шаардагдах энзимийг нийлэгжүүлэх процесст илүү энерги зарцуулдаг [19], [20]. Бидний судалгааны үр дүнгээр С ба Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх N-ын эргэлтэд оролцдог энзимтэй харьцуулахад илүү өндөр байгаа нь тухайн хөрсний бичил биетэнд N-тай харьцуулахад С, Р-ын хэрэгцээ өндөр байгааг илтгэж байна.

Мөн бусад судлаачдын үр дүнгээр С ба Р-ын

эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх нь ургамлын үлдэгдлийн задрал, уусдаг органик нэгдлийн хангамжтай холбоотой өөрчлөгддөг болох нь тогтоогдсон байна [21], [22]. Бидний судалгааны үр дүнд, хөрсний 15–30 см-ийн гүнтэй харьцуулахад 0–15 см-ийн гүнд энзимийн идэвх өндөр байгаа нь хөрсний органик нэгдлийн агууламж өндөр байгаатай холбоотой байх магадлалтай. Нөгөө талаас хөрсний гүнрүү бичил биетний үйл ажиллагаа буурдагтай холбоотой байх боломжтой [23]. Судлаачид Монголын тэгш өндөрлөгт хөрсний бичил биетний биомасс, бактери ба мөөгөнцрийн харьцаа, С ба N-ын эрдэсжих хурд хөрсний гүн, хуурайшилгаас хамаарч буурдаг болохыг тогтоосон байдаг [24].

Хур тунадас, органик нэгдэл, температур бидний судалгааны цэгүүд дэх хөрсний энзимийн идэвхэд, ялангуяа С ба Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвхэд илүү хүчтэй нөлөөлж байгаа нь регрессийн анализын үр дүнгээс харагдаж байна (4-р зураг). Хур тунадас ихсэхэд хөрсний чийгшил нэмэгдэж бичил биетний идэвх, бүтээмж нэмэгддэг [25], [26]. Бидний судалгааны үр дүнгээс харахад хур тунадас нэмэгдэхэд С ба Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх нэмэгдэхийн зэрэгцээ, органик нэгдлийн агууламж нэмэгдэж ($r=0.61$) байна. С ба Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх харьцангуй өндөр байгаа нь бичил биетний С ба Р-ын эх үүсвэр нь голдуу хөрсний органик нэгдэл байж болохыг илтгэнэ. Өөрөөр хэлбэл, хөрсөнд органик нэгдлийн задрал ихээр явагдаж байж болзошгүйг харуулж байна.

Нөгөө талаас, өндөр температур нь бичил биетний идэвх, хөрсний амьсгалыг нэмэгдүүлдэг [22]. Температур нэмэгдэхэд гидролитик энзимийн идэвх нэмэгддэг [10]. Харин бидний судалгаа энзимийн идэвх болон температурын хооронд сөрөг хамаарал байгааг харууллаа. Үүнийг температур нэмэгдэхэд хур тунадасны хэмжээ, үүнийг дагаад органик нэгдлийн агууламж ($r=-0.52$) буурч байгаатай холбон тайлбарлаж болно.

Глобал мета-анализын үр дүнгээс харахад температур болон хур тунадас ихсэх тусам энзимийн идэвх нэмэгддэг [22] боловч дэлхийн дулаарал нь органик нэгдлээр баялаг бүсийн өнгөн хөрсөн дэх органик нэгдлийн алдагдалд илүү хүчтэй нөлөөлж байна [27]. Үүнээс дүгнэхэд Монгол орны хувьд харьцангуй дулаан, органик нэгдлийн агууламж багатай бүс нутагт бичил биетний идэвхийг хуурайшил хязгаарлаж байх боломжтой юм. Харин органик нэгдлийн агууламж өндөртэй, хур тунадас

харьцангуй ихтэй бүс нутгуудын хөрсний органик нэгдлийн задрал бага температур (хүйтэн)-ын нөлөөгөөр хязгаарлагдаж байна.

Дүгнэлт

С, N, P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх уур амьсгал болон хөрсний органик нэгдлийн агууламжтай нягт хамааралтай байна. Температур нь хөрсний өнгөн хэсэгт (0–15 см-ийн гүнд) энзимийн идэвхэд хамгийн хүчтэй нөлөөлөгч хүчин зүйл байсан бол хөрсний гүн рүү температурын нөлөө буурч, харин хур тунадасны нөлөө нэмэгдэж байна. Уур амьсгалын өөрчлөлттэй холбоотойгоор цаашид дулаарах, хур тунадасны хэмжээ өөрчлөгдөх нь Монгол орны хувьд органик нэгдлээр баялаг бүсийн хөрсний органик нэгдлийн нөөц (ялангуяа өнгөн хөрсний өнгөн давхаргад), тогтвортой байдалд сөргөөр нөлөөлж болзошгүй байна.

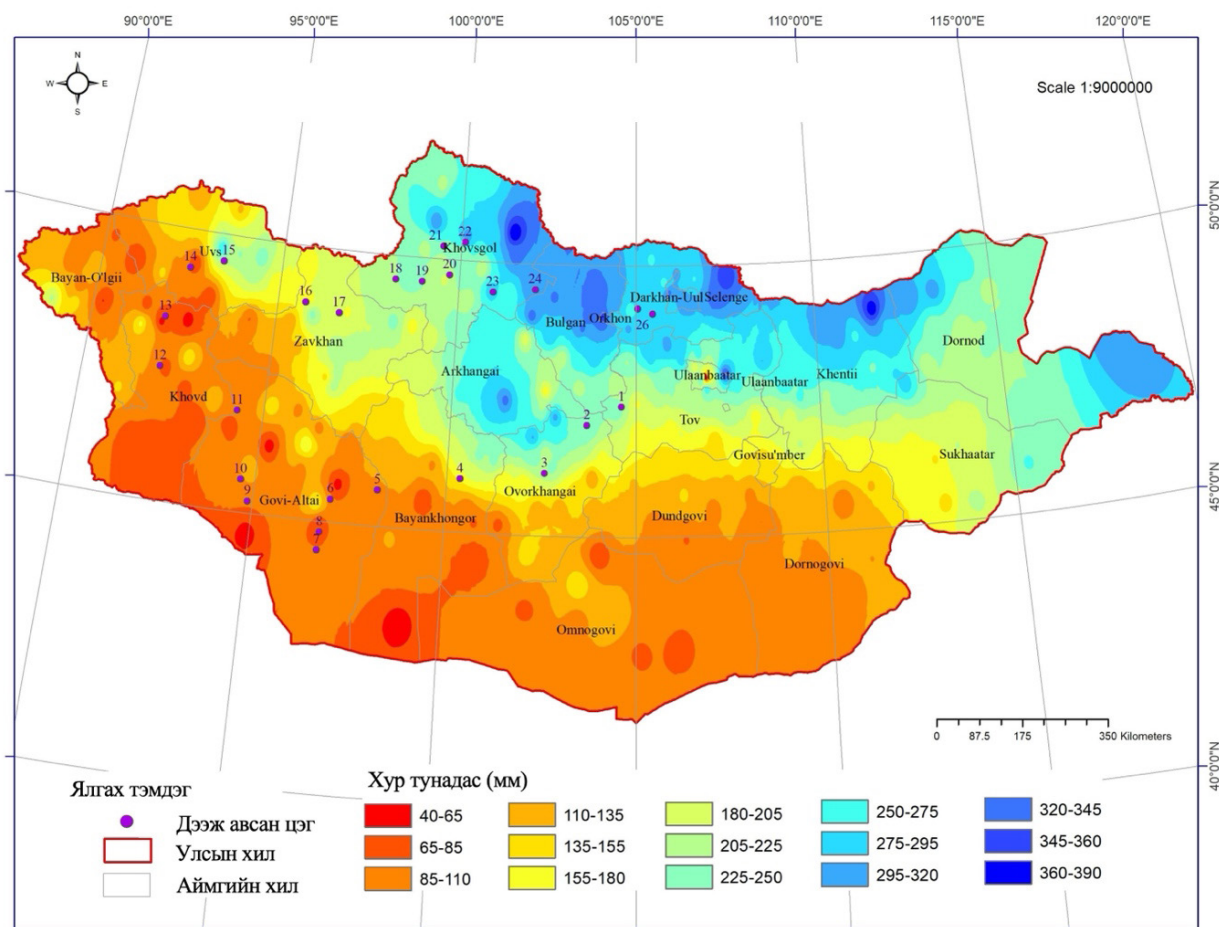
Талархал

Энэхүү судалгаа нь Олон улсын шинжлэх ухааны байгууллагуудын холбооны санхүүжилттэй “ANSO-CR-PP-2021-09” дугаартай төслийн нэг хэсэг юм.

Ашигласан бүтээл

- [1] B. G. Waring, S. R. Weintraub, and R. L. Sinsabaugh, “Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils,” *Biogeochemistry*, vol. 117, no. 1, pp. 101-113, Jan. 2014, <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9849-x>
- [2] Z. Xu et al., “Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC),” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 104, pp. 152-163, Jan. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.10.020>
- [3] K. Ndabankulu, S. O. Egbewale, Z. Tsvuura, and A. Magaddelela, “Soil microbes and associated extracellular enzymes largely impact nutrient bioavailability in acidic and nutrient poor grassland ecosystem soils,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16949-y>
- [4] Y. Yang, C. Liang, Y. Wang, H. Cheng, S. An, and S. X. Chang, “Soil extracellular enzyme stoichiometry reflects the shift from P- to N-limitation of microorganisms with grassland restoration,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 149, Oct. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107928>
- [5] F. K. Olagoke, K. Kaiser, R. Mikutta, K. Kalbitz, and C. Vogel, “Persistent activities of extracellular enzymes adsorbed to soil minerals,” *Microorganisms*, vol. 8, no. 11, pp. 1-15, Nov. 2020, <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111796>
- [6] R. L. Sinsabaugh et al., “Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale,” *Glob. Ecol. Bio-*

- geogr., Nov. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>
- [7] M. Wiesmeier et al., "Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales," *Geoderma*, vol. 338, pp. 83-100, Jan. 01, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- [8] Y. Cui et al., "Patterns of soil microbial nutrient limitations and their roles in the variation of soil organic carbon across a precipitation gradient in an arid and semi-arid region," *Sci. Total Environ.*, vol. 658, pp. 1440-1451, Mar. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.289>
- [9] J. Ru, Y. Zhou, D. Hui, M. Zheng, and S. Wan, "Shifts of growing-season precipitation peaks decrease soil respiration in a semiarid grassland," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 24, no. 3, pp. 1001-1011, Mar. 2018, <https://doi.org/10.1111/gcb.13941>
- [10] W. Xiao, X. Chen, X. Jing, and B. Zhu, "A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change," *Soil Biol Biochem.*, vol. 123, pp. 21-32, Aug. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.001>
- [11] D. S. Akinyemi, Y. Zhu, M. Zhao, P. Zhang, H. Shen, and J. Fang, "Response of soil extracellular enzyme activity to experimental precipitation in a shrub-encroached grassland in Inner Mongolia," *Glob. Ecol. Conserv.*, vol. 23, Sep. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01175>
- [12] Ж. Баярмаа ба Д. Пүрэв, "Төв аймгийн жаргалантын аж ахуйн хөрсний ферментийн идэвхийн судалгаа," *Mongolian J. Agric. Sci.*, vol. 22, no. 03, хх. 109-113, May 2018, <https://doi.org/10.5564/mjas.v22i03.953>
- [13] S. Li et al., "Sampling cores and sequencing depths affected the measurement of microbial diversity in soil quadrats," *Sci. Total Environ.*, vol. 767, May 2021, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144966>
- [14] M. J. J. Hoogsteen, E. A. Lantinga, E. J. Bakker, J. C. J. Groot, and P. A. Tittonell, "Estimating soil organic carbon through loss on ignition: Effects of ignition conditions and structural water loss," *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 66, no. 2, pp. 320-328, Mar. 2015, <https://doi.org/10.1111/ejss.12224>
- [15] J. M. Bremner and C. S. Mulvaney, Nitrogen-Total. In A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties- Agronomy Monograph*, vol. 9, pp. 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronomogr9.2.2ed.c31>
- [16] Ж. Золжаргал ба Б. Намуун, "Хөрсний хөдөлгөөнт фосфор тодорхойлох аргуудын харьцуулалт," *Монголын хөрс судлал.*, vol. 4, хх. 107-113.
- [17] C. R. Jackson, H. L. Tyler, and J. J. Millar, "Determination of microbial extracellular enzyme activity in waters, soils, and sediments using high throughput microplate assays," *J. Vis. Exp.*, no. 80, 2013, <https://doi.org/10.3791/50399>
- [18] V. L. Cenini et al., "Linkages between extracellular enzyme activities and the carbon and nitrogen content of grassland soils," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 96, pp. 198-206, May 2016, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.015>
- [19] D. S. Allison and M. P. Virousek, "Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 37, pp. 937-944, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.09.014>
- [20] D. S. Allison, N. M. B. Weintraub, T. Gartner, and M. P. Waldrop, "Evolutionary-Economic Principles as Regulators of Soil Enzyme Production and Ecosystem Function", In *Soil Enzym. Soil Biol*, vol. 22. G. Shukla and A. Varma, Eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_12
- [21] Z. Kotrocó et al., "Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 70, pp. 237-243, Mar. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.028>
- [22] G. Li, S. Kim, S. H. Han, H. Chang, D. Du, and Y. Son, "Precipitation affects soil microbial and extracellular enzymatic responses to warming," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 120, pp. 212-221, May 2018, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.014>
- [23] R. Vargas et al., "Precipitation variability and fire influence the temporal dynamics of soil CO₂ efflux in an arid grassland," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 18, no. 4, pp. 1401-1411, Apr. 2012, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02628.x>
- [24] L. Wang et al., "Extracellular Enzyme Stoichiometry Reveals Soil Microbial Carbon and Phosphorus Limitations in the Yimeng Mountain Area, China," *Forests*, vol. 13, no. 5, May 2022, <https://doi.org/10.3390/f13050692>
- [25] N. C. Dove, M. E. Barnes, K. Moreland, R. C. Graham, A. A. Berhe, and S. C. Hart, "Depth dependence of climatic controls on soil microbial community activity and composition," *ISME Commun.*, vol. 1, no. 1, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00081-5>
- [26] D. Chen et al., "Effects of aridity on soil microbial communities and functions across soil depths on the Mongolian Plateau," *Funct. Ecol.*, vol. 33, no. 8, pp. 1561-1571, 2019, <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13359>
- [27] W. Borken and E. Matzner, "Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 15, no. 4, pp. 808-824, 2009, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x>

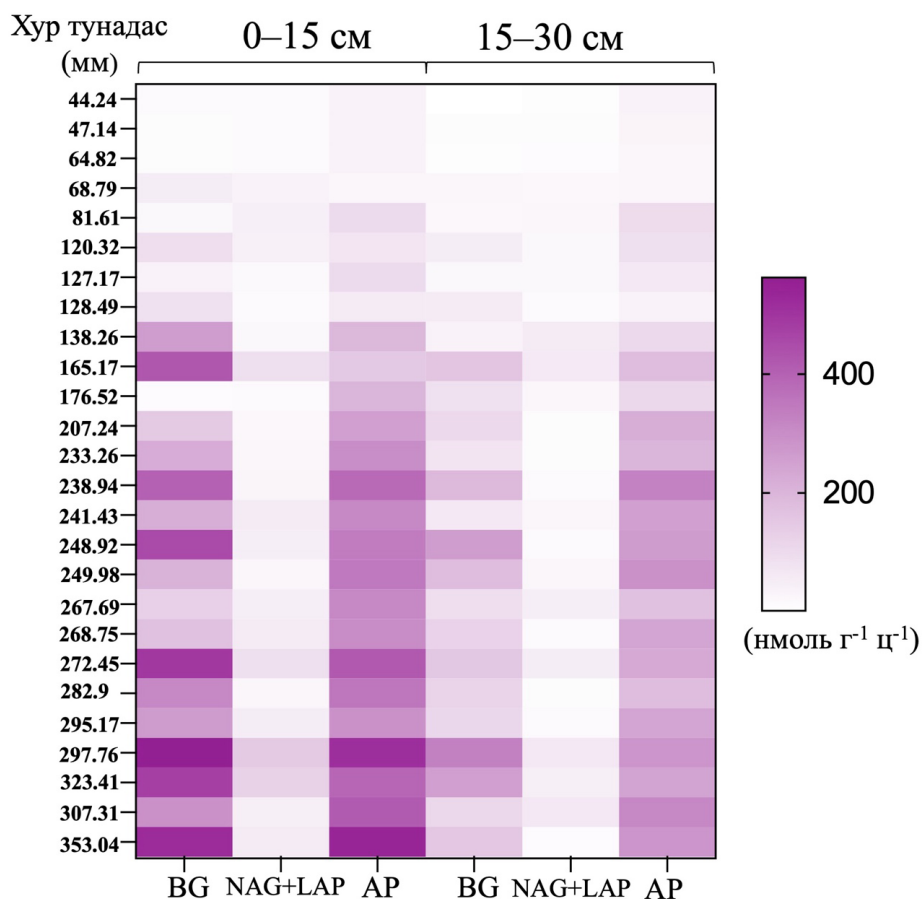


1-р зураг. Хөрсний дээж цуглуулсан цэгүүдийг хур тунадасны градиентын зурагт тэмдэглэсэн байдал.

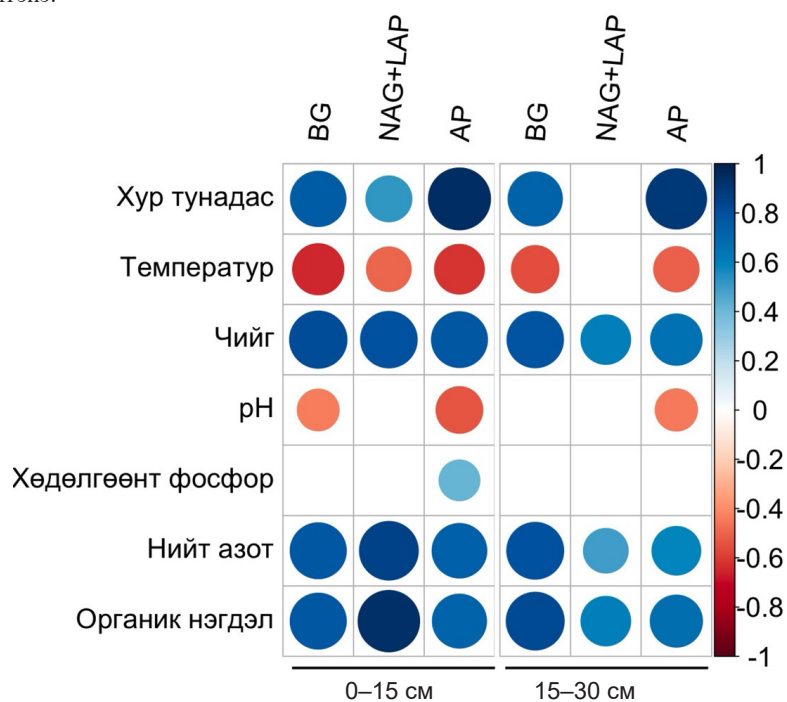
1-р хүснэгт. С, N, P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвхийн дээж цуглуулсан цэгүүд болон хөрсний гүнээс хамаарсан ялгааг two-way ANOVA ашиглан шалгасан үр дүн

		BG	NAG+LAP	AP
Дээж цуглуулсан цэгүүд	F-харьцаа	4.8	3.55	10.8
	p-утга	<0.0001	0.001	<0.0001
	Нийт вариацийн %	70.2	70.4	94.8
Хөрсний гүн	F-харьцаа	26.62	12.23	24.6
	p-утга	<0.0001	0.001	<0.0001
	Нийт вариацийн %	15.5	9.7	8.6

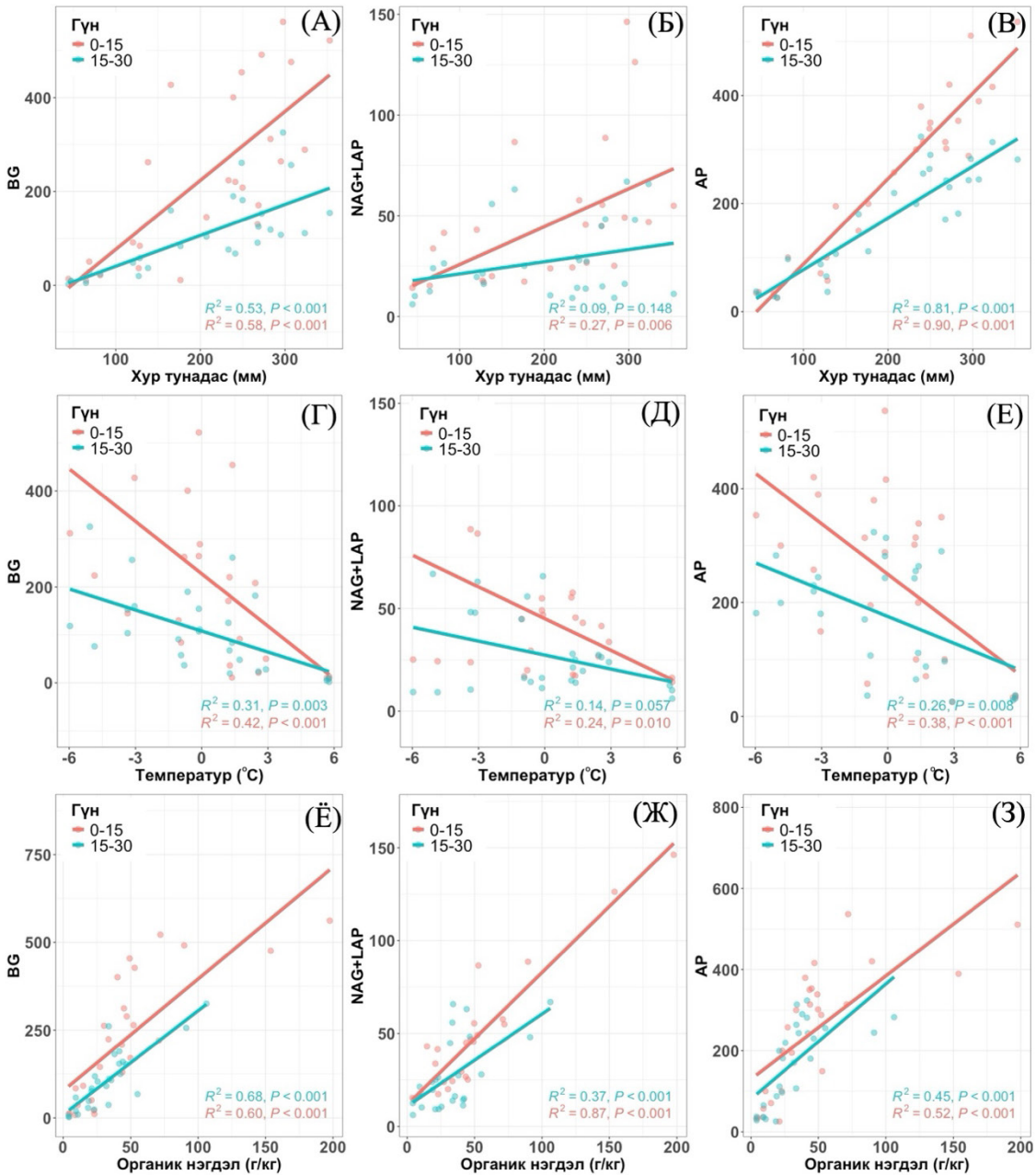
BG: β-глокозидаза
 LAP: Лейцин аминопептидаза
 NAG: N-ацетилглюкозамидаза
 AP: Хүчиллэг фосфатаза



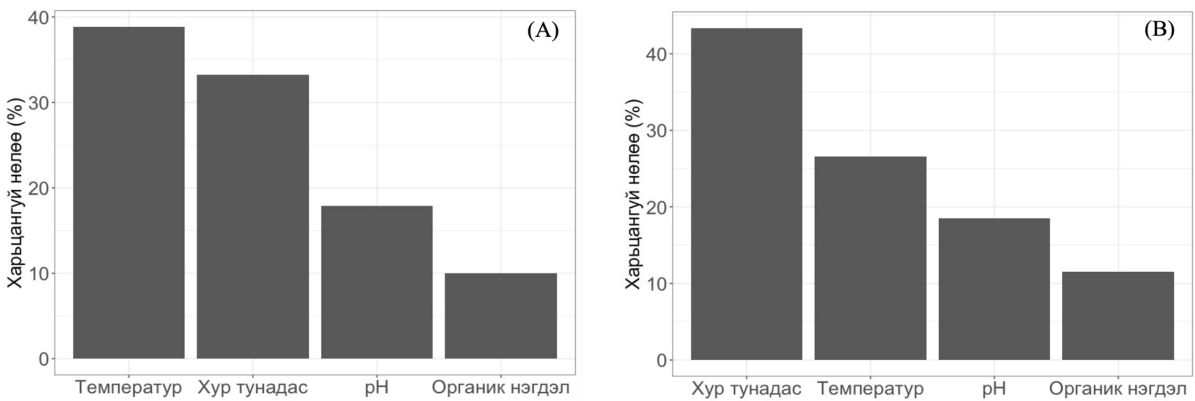
2-р зураг. C, N, P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвхийг харьцуулсан байдал. Хөрсний хоёр өөр гүн дэх энзимийн идэвхийг олон жилийн дундаж хур тунадасны нэмэгдэх дарааллаар байрлуулав. Өнгө нь гүн байх тусам энзимийн идэвх өндөр гэдгийг илтгэнэ.



3-р зураг. Хөрсний энзимийн идэвх болон хүрээлэн буй орчны хувьсагчдын хоорондын хамаарлыг Пирсоны корреляцийн анализаар шалгасан үр дүнг хөрсний хоёр өөр гүнээр (0–15 см ба 15–30 см) харуулав. Хур тунадас, олон жилийн дундаж хур тунадас; Температур, олон жилийн дундаж температур; Органик нэгдэл, хөрсний органик нэгдэл; Чийг, хөрсний чийгийн агууламж; pH; хөрсний pH; Хөдөлгөөнт фосфор, хөрсний хөдөлгөөнт фосфор; Нийт азот, хөрсний нийт азот; Зөвхөн статистикийн ач холбогдол бүхий хамаарал ($p < 0.05$)-ыг харуулав.



4-р зураг. Хур тунадас (А-В), температур (Г-Е) болон хөрсний органик нэгдэл (Ё-З)-ийн С, N ба Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимүүдийн идэвхэд үзүүлэх нөлөөг шугаман регрессийн аналizaар шалгасан үр дүн.



5-р зураг. Хөрсний энзимийн идэвхэд хөрс ба хүрээлэн буй орчны хүчин зүйлийн харьцангуй нөлөөг хөрсний хоёр гүнд харуулсан байдал. А. 0–15 см; Б. 15–30 см.