ԵՐԵՎԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԵՍԱՅԱՆ ՊԱՏՐԻԿ ԱՐԱՅԻ

ՇՐՋԱԿԱ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ ՄԱՐԴԱԾԻՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՄԲ ՊԱՅՄԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ՄԻ ՇԱՐՔ ԾԱՆՐ ՄԵՏԱՂՆԵՐԻ ՏԱՐԱԾԱԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ՄԻԳՐԱՑԻԱՆ

ԻԴ.04.01 «Երկրաբնապահպանություն» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝	տեխ. գիտ. դոկտոր **Սուքիասյան Աստղիկ Ռաֆիկի**
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	աշխ. գիտ. դոկտոր **Սայադյան Հովիկ Յախշիբեկի** տեխ. գիտ. թեկնածու **Պետրոսյան Վահագն Արսենի**
Առաջատար կազմակերպություն՝	Հայաստանի ազգային ագրարային համալսարան

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. հուլիսի 10-ին, ժամը 10:00-ին, Երևանի պետական համալսարանում գործող «Երկրագիտություն» մասնագիտական խորհրդի (թվանիշ 005) նիստում:

Հասցեն՝ ՀՀ, ք. Երևան, 0025, Ալեք Մանուկյան 1, ԵՊՀ, աշխարհագրության և երկրաբանության ֆակուլտետ:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ Երևանի պետական համալսարանի գրադարանում:

Սեղմագիրն առաքված է 2026թ. հունիսի 10-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար,
աշխ. գիտ. թեկնածու **Տ.Ա. Սարգսյան**

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

Ատենախոսության թեմայի արդիականությունը. Արդի բնապահպանական հետազոտությունների առաջնահերթ խնդիրներից է շրջակա միջավայրի (ՇՄ) բաղադրիչներում, հատկապես բնահողում, տարաբնույթ աղտոտիչների, վտանգավոր տարրերի և դրանց միացությունների կուտակման և տարածաժամանակային վերաբաշխման օրինաչափությունների բացահայտումը: Մարդածին ազդեցությամբ պայմանավորված գործընթացները հանգեցնում են ՇՄ նկատելի, իսկ որոշ դեպքերում անդառնալի հետևանքների, առաջին հերթին՝ բնահողերի վերին շերտի հավասարակշռության խախտմանը: Այս համատեքստում ժամանակակից բնապահպանական խնդիրներից մեկը բնահողի ծանր մետաղներով (ԾՄ) աղտոտումն է: Հողը, լինելով ԾՄ հիմնական կուտակիչ միջավայր, հանդես է գալիս որպես այդ տարրերի երկրորդային տարածման աղբյուր՝ զգալի ազդեցություն թողնելով հարակից էկոհամակարգերի վրա:

Հրատապ խնդիրներից է ներկայիս ստեղծված բնապահպանական իրավիճակի հետազոտության կազմակերպումը՝ հիմնված տարածա-ժամանակային փոփոխությունների բացահայտման վրա: Բնահողի վերին շերտում ԾՄ պարունակության փոփոխությունը պայմանավորված է նաև դրանց տեղափոխման կարողությամբ, ինչն իր հերթին կախված է հողի մի շարք ֆիզիկաքիմիական հատկություններից՝ թթվահիմնային պոտենցիալից, աղապարունակությունից, էլեկտրահաղորդականությունից և այլն, ինչպես նաև բնակլիմայական գործոններից՝ օդի ջերմաստիճանից, տեղումների քանակից, քամու արագությունից և այլն, ազդեցությունից: ԾՄ պարունակության փոփոխմամբ պայմանավորված բնահողի աղտոտման խնդիրը պահանջում է գնահատման և մշտադիտարկման համալիր մոտեցում, ինչպես ավանդական վերլուծական մոտեցումների, այնպես էլ առաջատար տեխնոլոգիաների կիրառում, ինչպիսիք են մեքենայական ուսուցման (ՄՈՒ) մեթոդները: Ավանդական մեթոդներն ըստ էության աշխատատար և ժամանակատար են, մինչդեռ ՄՈՒ կիրառումը նոր հորիզոններ է բացում ՇՄ գնահատման հարցում՝ հնարավորություն տալով վերլուծել մեծ ծավալի տվյալներ, բացահայտել թաքնված օրինաչափությունները և առկա տվյալների հիման վրա իրականացնել կանխատեսումներ: Ակնհայտ է, որ դասական վիճակագրական մեթոդները շարունակում են ծառայել որպես վերլուծության հիմնական գործիքակազմ: ՄՈՒ մեթոդաբանության կիրառումը բնահողի աղտոտման գործընթացների վերլուծության և կանխատեսման համար ժամանակի պահանջ

է: Այս մոտեցումը հնարավորություն է տալիս բացահայտել ուսումնասիրվող գործոնների և դրանց ազդեցությամբ պայմանավորված ՇՄ փոփոխությունների միջև հիմնական կապերը: ՄՈՒ մոդելներն արդյունավետ են տարբեր ծավալի փորձարարական տվյալների մշակման համար, քանի որ ներառում են ինչպես թվային ցուցանիշներ, այնպես էլ դասակարգային առանձնահատկություններ, ներառյալ հողի տեսակները: Անշուշտ, դասական վիճակագրական մեթոդները անբավարար են երկրաքիմիական համակարգերին բնորոշ բարդ, ոչ գծային կապերը նկարագրելու համար:

ՄՈՒ ալգորիթմների կիրառումը ՇՄ հետազոտություններում ոչ միայն հնարավորություն է տալիս ավելի արդյունավետ վերլուծել առկա տվյալները, այլև մշակել բարդ խնդիրների լուծմանն ուղղված նորարարական մոտեցումներ՝ նույնականացնելով տվյալների միջև թաքնված օրինաչափությունները և բարդ փոխհարաբերությունները, ինչը խիստ անհրաժեշտ է հողի ԾՄ աղտոտումը գնահատելու համար: Կանխատեսողական մոդելների բացատրելիության բարձրացման հետ մեկտեղ գերակա խնդիր է դառնում աղտոտման միտումների հեռանկարային գնահատումը, ինչը կարող է հիմք հանդիսանալ աղտոտված տարածքների բացահայտման, մշտադիտարկման համակարգերի կատարելագործման և ՇՄ որակի կառավարմանն ուղղված ռազմավարական որոշումների ընդունման համար:

Աշխատանքի նպատակը և խնդիրները. Աշխատանքի նպատակն է ուսումնասիրել ՀՀ Հրազդանի, Գավառի և Մարտունու բնահողային գոտիների ներկայիս էկոլոգիական վիճակը՝ բացահայտելով դրանց աղտոտվածության աստիճանը, ինչպես նաև մշակել և փորձարկել բնահողի վերին շերտում ուսումնասիրվող ԾՄ միգրացիայի տարածաժամանակային մոդել՝ օգտագործելով ՄՈՒ ալգորիթմները:

Նպատակին հասնելու համար առաջադրվել և լուծվել են հետևյալ խնդիրները՝

- բնահողի վերին շերտում ԾՄ կուտակման և տարածաժամանակային միգրացիայի հայտնի մեթոդների վերլուծություն,
- բնահողի վերին շերտում ԾՄ բնակլիմայական, ֆիզիկաքիմիական հատկությունների և մարդածին գործոնների ազդեցությամբ պայմանավորված տարածաժամանակային միգրացիայի առանձնահատկությունների ուսումնասիրություն,
- հողածածկույթի աղտոտվածության երկրաբնապահպանական ցուցանիշների հաշվարկի հիման վրա ուսումնասիրվող տարածքներում

բնահողի վերին շերտում ԾՄ պարունակության փոփոխմամբ պայմանավորված բնապահպանական ռիսկի գնահատում,

- բնահողի վերին շերտում ԾՄ աղտոտվածության տարածաժամանակային միգրացիայի հետազոտությունների հիման վրա, ՄՈւ ալգորիթմների կիրառմամբ, մաթեմատիկական մոդելի մշակում և փորձարարական տվյալների միջոցով դրա հավաստիության գնահատում,
- բնահողի վերին շերտում ԾՄ պարունակության փոփոխությունների տվյալների հիման վրա տարածաժամանակային տեղափոխման կարճաժամկետ և երկարաժամկետ կանխատեսման մաթեմատիկական մոդելի մշակում:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները.

1. Հրազդանի, Գավառի և Մարտունու վարչական տարածքներում (ՎՏ)՝ կախված մարդածին ազդեցության աստիճանից, բնակլիմայական պայմաններից և հողի ֆիզիկաքիմիական հատկություններից, բնահողի վերին շերտում հետազոտվող ԾՄ համալիր պարունակության տարածաժամանակային բաշխվածության առանձնահատկությունների բացահայտում,
2. ՄՈւ ալգորիթմների կիրառմամբ դիտարկվող ՎՏ բնահողի վերին շերտում հետազոտվող ԾՄ պարունակության տարածաժամանակային բաշխվածության փոփոխության բացահայտում,
3. Կախված հետազոտական տվյալների ծավալից մշակված ՄՈւ ալգորիթմների միջոցով ԾՄ տարածաժամանակային միգրացիայի կանխատեսման մոդելի գնահատում,
4. Բնապահպանական ռիսկերի գնահատման նպատակով ԾՄ տարածաժամանակային միգրացիայի կարճաժամկետ և երկարաժամկետ կանխատեսման մոդելի մշակում:

Աշխատանքի գիտական նորույթը.

- Հիմնվելով բնահողի վերին շերտում ԾՄ կուտակման և տարածաժամանակային միգրացիայի արժեքների վրա իրականացվել է Հրազդան, Գավառ և Մարտունի ՎՏ հարակից բնահողային տարածքների երկրաբնապահպանական վիճակի համալիր գնահատում՝ հաշվի առնելով բնակլիմայական պայմանները, հողի ֆիզիկաքիմիական հատկությունները և մարդածին գործոնների ազդեցությունը:
- Մշակվել է բնահողի վերին շերտում ԾՄ կուտակման և տարածման կանխատեսման մաթեմատիկական մոդել, որի ճշտությունը հիմնված է

ուսումնասիրվող տարածքների տարբեր բնակլիմայական գործոնների վրա:

- Ստացված տվյալների կիրառմամբ ՄՈ ալգորիթմների միջոցով մշակվել է կարճաժամկետ և երկարաժամկետ կանխատեսման մաթեմատիկական մոդել, որի կիրառումը հնարավորություն է տալիս գնահատել ԾՄ միգրացիայի դինամիկան:

Աշխատանքի կիրառական նշանակությունը՝

Աշխատանքի արդյունքները և մշակված մեթոդաբանությունն ունեն անմիջական գործնական կիրառություն բնապահպանական, գյուղատնտեսական և առողջապահական ոլորտներում՝ նպաստելով ԾՄ կառավարման արդյունավետության բարձրացմանը, մասնավորապես՝

- ***Մշտադիտարկման համակարգերի օպտիմալացում.*** Մշակված տարածաժամանակային կանխատեսման մոդելը հնարավորություն է տալիս բնապահպանական կառույցներին առավել թիրախային և ծախսարդյունավետ դարձնել հողի նմուշառման և լաբորատոր հետազոտությունների գործընթացը՝ կենտրոնանալով բարձր ռիսկային կամ դինամիկ փոփոխությունների ենթարկվող գոտիների վրա:
- ***Տեխնոլոգիական ունիվերսալ գործիքակազմի ստեղծում.*** Կիրառված ՄՈ ալգորիթմները և ստացված մոդելը կարող են հեշտությամբ տեղայնացվել և հարմարեցվել ՀՀ այլ մարզերի (հատկապես հանքարդյունաբերական կենտրոնների՝ Լոռի, Սյունիք) բնահողերի աղտոտվածության և էկոլոգիական ռիսկերի գնահատման համար:
- ***Տվյալահենք որոշումների կայացում՝*** Հետազոտության արդյունքում ստացված տվյալները և վերլուծությունները ամուր գիտական հենք են ստեղծում տարածքային պլանավորման, հողերի ռեկուլտիվացիայի (վերականգնման) ծրագրերի մշակման և բնապահպանական ռազմավարությունների հաստատման համար:
- ***Հանրային առողջության ռիսկերի մեղմացում.*** Բացահայտված օրինաչափությունները և աղտոտման միտումները կարևոր տեղեկատվական հիմք են առողջապահական մարմինների և տեղական ինքնակառավարման մարմինների համար՝ նպատակաուղղված կանխարգելիչ միջոցառումներ իրականացնելու և ուսումնասիրվող համայնքներում բնակչության առողջության պահպանմանն ուղղված քայլեր ձեռնարկելու համար:
- ***Գյուղատնտեսական ռեսուրսների անվտանգ կառավարում.*** ԾՄ աղտոտվածության կարճաժամկետ և երկարաժամկետ կանխատեսումները թույլ են տալիս ռացիոնալ պլանավորել հողօգտագործումը, խուսափել վտան-

գավոր գոտիներում գյուղատնտեսական մթերքի արտադրությունից՝ կանխելով տոքսիկ տարրերի ներթափանցումը սննդային շղթա՝ դրանով իսկ ապահովելով պարենային անվտանգությունը:

Այսպիսով, աշխատանքն ապահովում է անցում ավանդական, զուտ արձանագրային բնապահպանությունից դեպի ժամանակակից, կանխատեսողական և կառավարելի էկոլոգիական մոդելավորում:

Աշխատանքի փաստացի նյութը.

Աշխատանքն իրականացվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Լեռնամետալուրգիայի և քիմիական տեխնոլոգիաների» ինստիտուտի և «Հայաստանի ազգային ճարտարագիտական լաբորատորիաներ (ANEL)» համապատասխան նյութատեխնիկական հնարավորություններով լաբորատորիաներում, ՀՀ ԳԱԱ-ի «Փորձաքննությունների ազգային բյուրո» ՊՈԱԿ-ի նյութագիտական փորձաքննությունների բաժնի լաբորատորիայում, ՃՇՀԱՀ-ի «Շինարարական քիմիայի և շրջակա միջավայրի պահպանության» գիտահետազոտական լաբորատորիայում: Աշխատանքի իրականացման համար ելակետային նյութեր և տեղեկատվական հիմք են հանդիսացել ՀՀ ԿԳՄՍՆ ԲԿ և ԳԿ ֆինանսավորմամբ «Ծանր մետաղների տեղափոխությունը և աղտոտվածության գնահատումը ջուր-հող-բույս շղթայով ֆիտոինդիկացիայի օգնությամբ» (ծածկագիր 15T-2H409) և «ՀՀ բնահողային գոտիների տեխնածին աղտոտման բազմաբաղադրիչ ազդեցության երկրաբնապահպանական ռիսկերի գնահատում և դրանց կանխարգելման համալիր միջոցառումների մշակում» (ծածկագիր 21T-2H216) ծրագրերի հետազոտական տվյալները, տարեկան հաշվետվությունները, հրապարակված աշխատանքները: Աշխատանքի փաստացի նյութ է հանդիսացել «21T-2H216» ծածկագրով ծրագրի հետազոտական աշխատանքների շարունակությունը, որոնց իրականացման ընթացքում հեղինակը անմիջական մասնակցություն է ունեցել դաշտային պայմաններում նմուշառմանը և դրանց հետագա լաբորատոր մշակմանը, իրականացրել է արդյունքների վերլուծություն և ընդհանրացում, ինչպես նաև տարածաժամանակային կանխատեսման մոդելի ստեղծում և փորձարկում:

Ատենախոսության փորձահավանությունը և հրապարակումները.

Հետազոտության արդյունքները զեկուցվել են տեղական և միջազգային գիտական հարթակներում՝ «COST Action PLANTMETALS: Trace metal metabolism in plants» (Սլովենիա, Լյուբլյանա, 2024թ.), «Կառավարման տեսության և պրակտիկայի փոխակերպումը XXI դարում» միջազգային գիտագործնական կոնֆերանսում (բանավոր զեկույց, ՀՀ, Երևան, 2024թ.),

«Հիդրոօդերևութաբանության և շրջակա միջավայրի մոնիտորինգի ընթացիկ խնդիրները փոփոխվող կլիմայի պայմաններում. ադապտացիա, կայունություն և արտադրական պրոցեսներ» միջազգային գիտաժողովում (բանավոր զեկույց, ՀՀ, Երևան, 2025թ.), առցանց բանավոր զեկույցներով «Էկոլոգիայի և բնօգտագործման արդի հիմնախնդիրներ» միջազգային XXVI գիտագործ-նական գիտաժողով (ՌԴ, Մոսկվա, 2025թ.), «Արդյունաբերական քաղաքների էկոլոգիան» համառուսաստանյան գիտագործնական կոնֆերանսում (ՌԴ, Կազան, 2025թ.), «Թվային նորարարական տեխնոլոգիաների ապագան և դրանց ներդրումը գիտության և կրթության համակարգում» միջազգային գիտաժողովում (26 նոյեմբեր, Թուրքմենստան, Աշխաբադ, 2025թ.), «Էկոլոգիայի և բնօգտագործման արդի հիմնախնդիրներ» միջազգային XXVII գիտագործնական գիտաժողով (ՌԴ, Մոսկվա, 2026թ.):

Ատենախոսության հիմնական դրույթները և արդյունքներն արտացոլված են հրատարակված **11** աշխատությունում, որոնցից մեկը՝ ազդեցության գործակցով ամսագրում:

Աշխատանքի կառուցվածքը և ծավալը. Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, 3 գլուխներից, եզրակացություններից, գրականության ցանկից և հավելվածից: Օգտագործված գրականությունն ընդգրկում է 135 անվանում: Աշխատանքը շարադրված է 162 էջի վրա, ներառում է 34 աղյուսակ և 8 նկար: Հավելվածը կազմում է 27 էջ:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԱՄԱՌՈՏ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

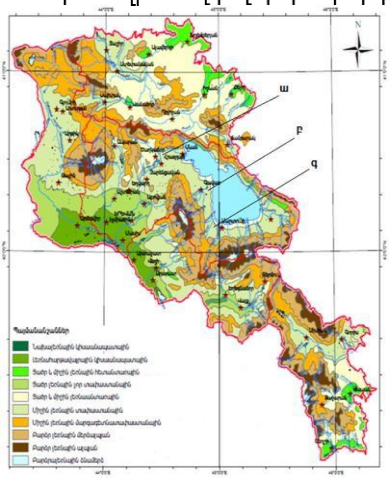
ԳԼՈՒԽ 1. ՀՈՂԵՐԸ ԾԱՆՐ ՄԵՏԱՂՆԵՐՈՎ ԱՂՏՈՏՄԱՆ ԱՐԴԻ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ (ԳՐԱԿԱՆ ԱԿՆԱՐԿ)

Առաջին գլխում ամփոփվել են հողերում ԾՄ պարունակության, կուտակման, միգրացիայի և տարածաժամանակային բաշխվածության վերաբերյալ ժամանակակից գիտական մոտեցումները: Քննարկվել են ԾՄ աղտոտվածության գնահատման նորմատիվային հիմքերը, Հայաստանի հողերում դրանց մարդածին կուտակման առանձնահատկությունները, ինչպես նաև ուսումնասիրվող ՎՏ՝ Հրազդանի, Գավառի և Մարտունու բնակլիմայական ու երկրաբանաաշխարհագրական պայմանները: Առանձին անդրադարձ է կատարվել ՄՈ մեթոդների կիրառման նպատակահարմարությանը՝ ԾՄ պարունակությունների տարածաժամանակային փոփոխությունների գնահատման և կանխատեսման համար:

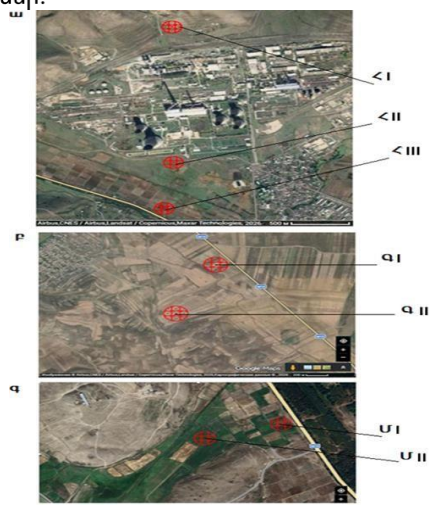
ԳԼՈՒԽ 2. ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅԱՆ ՆՅՈՒԹԵՐԸ ԵՎ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ

Հետազոտության օբյեկտ են հանդիսացել ՀՀ Կոտայքի մարզի Հրազդան քաղաքի ջերմաէլեկտրակայանի և ցեմենտի գործարանի շրջակայքի, ինչպես

նաև Գեղարքունիքի մարզի Գավառի և Մարտունի վարչական շրջանների հարակից բնահողային տարածքները (նկ.1): Հողի նմուշառման նպատակով առանձնացվել են Հրազդանի ՎՏ երեք դիտակետեր՝ ***ՀI***, ***ՀII*** և ***ՀIII***, Գավառի ՎՏ երկու դիտակետեր՝ ***ԳI*** և ***ԳII***, և Մարտունու ՎՏ երկու դիտակետեր՝ ***ՄI*** և ***ՄII*** (նկ. 2): Նմուշառման, նմուշապատրաստման աշխատանքներն իրականացվել են ընդունված մեթոդական պահանջներին համապատասխան: Հետազոտվող ծանր մետաղ(անման)ները խմբավորված են ըստ վտանգավորության դասերի՝ ***ցածր***՝ բարիում (Ba), վանադիում (V), մանգան (Mn), ստրոնցիում (Sr), ***միջին***՝ պղինձ (Cu), քրոմ (Cr), և ***բարձր***՝ ցինկ (Zn), կապար (Pb), արսեն (As): Հողանմուշների տարրային կազմը որոշվել է ռենտգենաֆլուորեսցենտային սպեկտրալ վերլուծության մեթոդով՝ շարժական Thermo Scientific™ Niton™ անալիզատորի (Thermo Fisher Scientific Inc., ԱՄՆ) կիրառմամբ: ԾՄ պարունակությունների հետ մեկտեղ որոշվել են նաև հողի ֆիզիկաքիմիական հիմնական ցուցանիշները՝ pH, աղապարունակությունը և էլեկտրահաղորդականությունը (ԷՀ), որոնք դիտարկվել են որպես ԾՄ շարժունակության և կուտակման վրա ազդող կարևոր գործոններ:



*Նկ.1 ՀՀ լանդշաֆտային գոտիներ (ՇՄ նախարարություն, 2019թ.) որտեղ **ա** - Հրազդանի ՎՏ երեք դիտակետեր, **բ** - Գավառի ՎՏ երկու դիտակետեր, **գ** - Մարտունու ՎՏ երկու դիտակետեր*



*Նկ.2 Դիտակետերի տեղակայումն ըստ վարչական տարածքների, որտեղ **ա** - Հրազդանի ՎՏ երեք դիտակետեր՝ **ՀI**, **ՀII** և **ՀIII**, **բ** - Գավառի ՎՏ երկու դիտակետեր՝ **ԳI** և **ԳII**, **գ** - Մարտունու ՎՏ երկու դիտակետեր՝ **ՄI** և **ՄII***

Ուսումնասիրվող տարածքների հողերի աղտոտվածության երկրաբնապահպանական գնահատման համար հաշվարկվել են կուտակման (***Cc***), ցրման (***Sc***) գործակիցները, երկրակուտակման գործակիցը (***Iերկ***), աղտոտվածության գումարային ցուցանիշը (***Zc***) և պոտենցիալ էկոլոգիական ռիսկի ցուցանիշը (***RI***): Այդ ցուցանիշների կիրառումը հնարավորություն է տվել գնահատել ինչպես առանձին տարրերի կուտակման աստիճանը, այնպես էլ ուսումնասիրվող տարածքների բնապահպանական վիճակը:

Տվյալների վիճակագրական մշակման ընթացքում իրականացվել է կոռելացիոն վերլուծություն՝ ԾՄ պարունակությունների տարածաժամանակային փոփոխությունները, սեզոնային առանձնահատկությունները և հողի ֆիզիկաքիմիական ցուցանիշների հետ կապերը բացահայտելու նպատակով: Ստացված արդյունքները հիմք են ծառայել ԾՄ պարունակությունների փոփոխության մոդելավորման և կանխատեսման համար:

ԾՄ պարունակությունների տարածաժամանակային կանխատեսման նպատակով կիրառվել են **պարզ ժամանակային** և **բազմագործոն գծային ռեգրեսիոն մոդելներ**: Մոդելավորման հիմնական նպատակն է եղել գնահատել, թե ուսումնասիրվող ԾՄ պարունակությունները ինչպես են փոխվում ժամանակի ընթացքում, ինչպես նաև պարզել, թե այդ փոփոխությունների վրա ինչ ազդեցություն կարող են ունենալ հողի ֆիզիկաքիմիական և բնակլիմայական գործոնները: Մոդելում կախյալ փոփոխական է ընդունվել հողում ԾՄ պարունակությունը՝ C, *մգ/կգ*, իսկ անկախ փոփոխականների կազմում ներառվել են ժամանակային փոփոխականը, հողի ֆիզիկաքիմիական ցուցանիշները և կլիմայական պարամետրերը:

Մոդելավորման առաջին փուլում կիրառվել է **պարզ ժամանակային գծային ռեգրեսիոն մոդել**, որի միջոցով գնահատվել է ԾՄ պարունակության ընդհանուր ժամանակային միտումը՝ առանց լրացուցիչ գործոնների ներառման [1, 2, 7]: Պարզ ժամանակային մոդելը ներկայացվել է հետևյալ տեսքով [8, 9].

$$ln(C_i) = \beta_0 + \beta_1 Year_i \qquad (1)$$

որտեղ β_0 - մոդելի ազատ անդամն է, β_1- ժամանակային գործակիցը:

Երկրորդ փուլում կիրառվել է **բազմագործոն գծային ռեգրեսիոն մոդել**, որտեղ ԾՄ պարունակության փոփոխությունը դիտարկվել է ժամանակային, հողի ֆիզիկաքիմիական և կլիմայական գործոնների համատեղ ազդեցության պայմաններում: Բազմագործոն մոդելը ներկայացվել է հետևյալ տեսքով.

$$ln(C_i) = \beta_0 + \beta_1 Year_i + \beta_2 pH_i + \beta_3 S_i + \beta_4 EC_i + \beta_5 P_i + \beta_6 W_i + \beta_7 T_i \qquad (2)$$

ԳԼՈՒԽ 3. ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ ՎԵՐԾԱՆՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվող Հրազդանի, Գավառի և Մարտունու ՎՏ հողանմուշներում ԾՄ պարունակությունների տարածաժամանակային փոփոխությունների գնահատումն իրականացվել է համալիր մոտեցմամբ՝ ներառելով դրանց

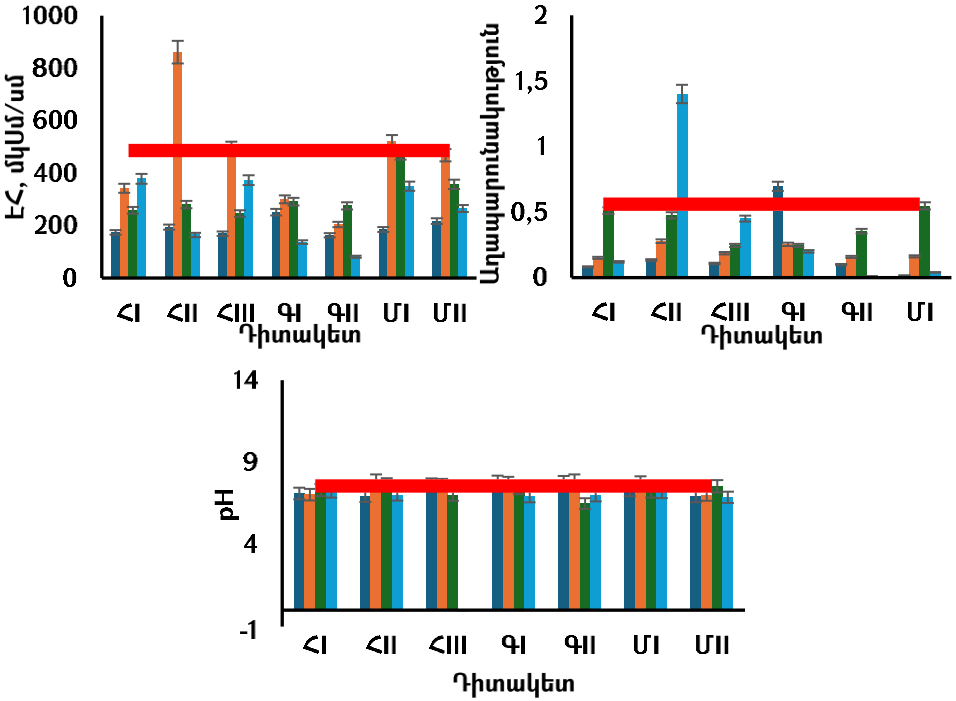
համեմատությունը ՍԹԿ հետ, հողի ֆիզիկաքիմիական ցուցանիշների վերլուծությունը, մուտագեն պոտենցիալի գնահատումը, երկրաբանապահպանական գործակիցների հաշվարկը և կանխատեսման մոդելավորումը: Նման մոտեցումը հնարավորություն է տվել ոչ միայն բնութագրել հողերի աղտոտվածության փաստացի մակարդակը, այլև բացահայտել ԾՄ կուտակման, միգրացիայի և հետագա փոփոխությունների վրա ազդող հիմնական գործոնները:

ԾՄ պարունակությունների սեզոնային և միջտարեկան փոփոխությունների գնահատումն իրականացվել է դրանց ՍԹԿ հետ համեմատությամբ: 2021թ. Հրազդանի և Գավառի ՎՏ մի շարք դիտակետերում **բարձր** վտանգավորության դասի՝ Pb և As տարրերի պարունակությունների աճն էականորեն նպաստել է աղտոտվածության համալիր ցուցանիշների ձևավորմանը: Pb պարունակությունները 2022թ. դիտարկված ժամանակահատվածներում հիմնականում տատանվել են 14,4-32,5 *մգ/կգ* սահմաններում՝ ՍԹԿ գերազանցելով շուրջ 1,4-3,3 անգամ, իսկ As առավել արտահայտված գերազանցումները գրանցվել են 2021թ.՝ հատկապես Հրազդանի դիտակետերում: **Միջին** վտանգավորության դասի տարրերից առավել նշանակալի փոփոխություններ արձանագրվել են Cu դեպքում: 2021թ. Հրազդանի ***ՀI*** և ***ՀII***, ինչպես նաև Գավառի ***ԳI*** և ***ԳII*** դիտակետերում Cu պարունակությունները կազմել են համապատասխանաբար 92,8, 87,3, 84,2 և 84,6 *մգ/կգ*՝ ՍԹԿ գերազանցելով մոտ 6 անգամ: Հետագա դիտարկումներում Cu պարունակությունները մի շարք դիտակետերում նվազել են, սակայն առանձին դեպքերում պահպանվել են նորմատիվային շեմը գերազանցող արժեքներ: **Ցածր** վտանգավորության դասի տարրերից առանձնացել է Sr. Հրազդանի ***ՀI*** և ***ՀII*** դիտակետերում դրա պարունակությունները շարունակաբար գերազանցել են նորմատիվային շեմը, իսկ Գավառի ***ԳII*** դիտակետում 2021թ. 540,0 *մգ/կգ* արժեքը 2025թ. հասել է 620,4 *մգ/կգ*՝ ՍԹԿ գերազանցելով ավելի քան 2 անգամ:

Հողանմուշների սեզոնային մուտագեն պոտենցիալի գնահատումը ցույց է տվել, որ գենոտոքսիկ ակտիվության դրսևորումները որոշակիորեն համընկնում են ԾՄ աղտոտվածության սեզոնային փոփոխությունների հետ: Առավել արտահայտված մուտագեն ակտիվություն գրանցվել է գարնանային ժամանակահատվածում, ինչը կարող է պայմանավորված լինել ձնհալի, մակերևութային հոսքերի ակտիվացմամբ, աղտոտիչների վերաբաշխման և գյուղատնտեսական աշխատանքների ակտիվացմամբ [5]:

Հողի ֆիզիկաքիմիական ցուցանիշների վերլուծությամբ գնահատվել են ԷՀ, աղապարունակության և pH միջտարեկան փոփոխությունները ուսումնասիրվող դիտակետերում (նկ. 3): Նշված ցուցանիշները կարևոր են ԾՄ միգրացիոն վարքի մեկնաբանման համար, քանի որ կարող են ազդել մետաղների

լուծելիության, շարժունակության և հողի վերին շերտում կուտակման գործընթացների վրա: Այսպես ԷՀ և աղապարունակությունը դիտակետերի ու տարիների կտրվածքով դրսևորել են առավել արտահայտված տատանումներ, մինչդեռ pH արժեքները հիմնականում պահպանվել են չեզոքից թույլ հիմնային միջակայքում: Ստացված արդյունքները հիմք են հանդիսացել ԾՄ պարունակությունների և հողի ֆիզիկաքիմիական ցուցանիշների միջև կոռելացիոն կապերի գնահատման համար:

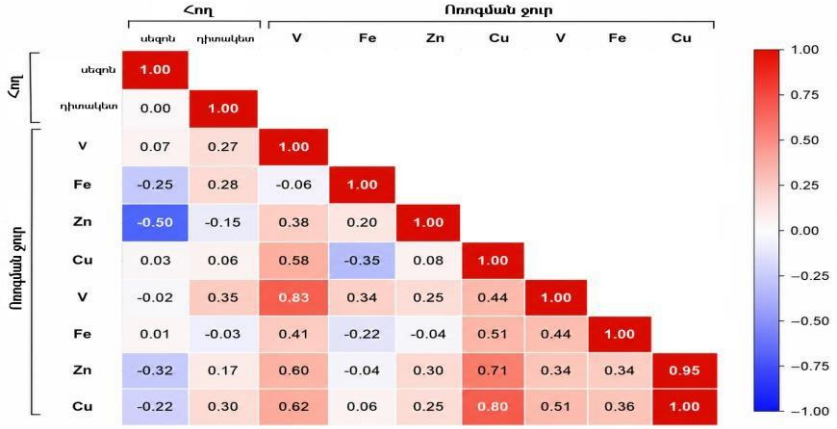


Նկ. 3. Հրազդանի, Գավառի և Մարտունու ՎՏ հողանմուշներում ԷՀ, աղապարունակության և pH-ի միջտարեկան փոփոխությունները

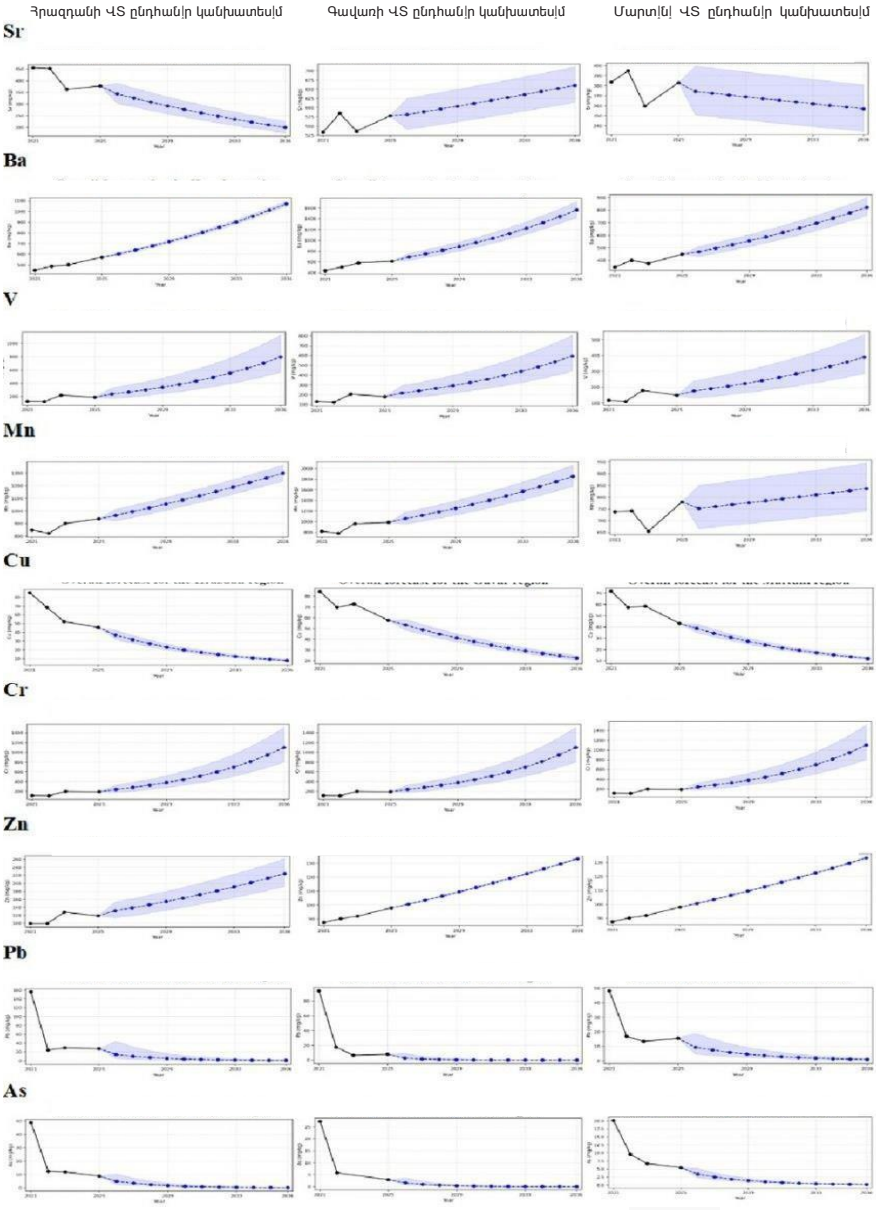
Աղտոտվածության գումարային ցուցանիշի՝ Z_c հաշվարկը հնարավորություն է տվել գնահատել ԾՄ համակցված ազդեցությամբ ձևավորված աղտոտվածության մակարդակը: Այսպես, 2021թ. Հրազդանի և Գավառի ՎՏ մի շարք դիտակետերում արձանագրվել է միջին մակարդակի աղտոտվածություն. Հրազդանի ՎՏ Z_c արժեքները կազմել են 26,16-32,02, իսկ Գավառի ՎՏ՝ 18,04-21,27: Առավել արտահայտված աղտոտվածությունը բնորոշ է եղել Հրազդանի

դիտակետերին: 2022թ. բոլոր դիտակետերում Z_c արժեքները նվազել են մինչև 5,52-8,89՝ համապատասխանելով թույլ աղտոտվածության մակարդակին: Ցուցանիշների նվազումը հիմնականում պայմանավորված է Pb և As տարրերի կոնցենտրացիայի գործակիցների նվազմամբ, թեև առանձին դեպքերում Cu, Zn, Sr և V տարրերի արժեքները պահպանվել են համեմատաբար բարձր: 2023 և 2025 թթ. տվյալների համադրումը ցույց է տվել, որ հողանմուշների մեծ մասը մնացել է թույլ աղտոտվածության տիրույթում: Երկրակուտակման ցուցանիշի ($I_{երկ}$) արդյունքները ևս հաստատել են բարձր վտանգավորության տարրերի առաջնային դերը աղտոտվածության ձևավորման մեջ: 2021թ. Pb դեպքում Հրազդանի դիտակետերում արձանագրվել են բարձր $I_{երկ}$ արժեքներ՝ ***ՀՇ*** 3,07, ***ՀՍ*** 3,46 և ***ՀՍՍ*** 3,55 (V դաս), իսկ Գավառի դիտակետերում՝ ***ԳՇ*** 2,77 և ***ԳՍ*** 2,51 (IV դաս): As համար նույն թվականին Հրազդանի դիտակետերում $I_{երկ}$ արժեքները կազմել են ***ՀՇ*** 2,38, ***ՀՍ*** 2,69 և ***ՀՍՍ*** 2,83 (IV դաս), իսկ Գավառում՝ ***ԳՇ*** 2,01 (III դաս) և ***ԳՍ*** 1,58 (II դաս): Այս տվյալները ցույց են տալիս, որ 2021թ. աղտոտվածության ինտեգրալ մակարդակի ձևավորման մեջ հիմնական դեր են ունեցել հատկապես Pb և As տարրերը: Պոտենցիալ էկոլոգիական ռիսկի (***RI***) ցուցանիշի վերլուծությամբ պարզվել է, որ ուսումնասիրվող տարածքների գերակշիռ մասում ռիսկի մակարդակը հիմնականում պահպանվել է ցածր տիրույթում:

«Հող-ջուր» համակարգի մոդելային գնահատմամբ բացահայտվել է, որ հողում և այն ոռոգող ջրում մի շարք ԾՄ պարունակությունների փոփոխությունները դրսևորում են փոխկապակցված բնույթ՝ վկայելով այդ միջավայրերի միջև տարրերի հնարավոր միգրացիայի մասին (նկ. 4):



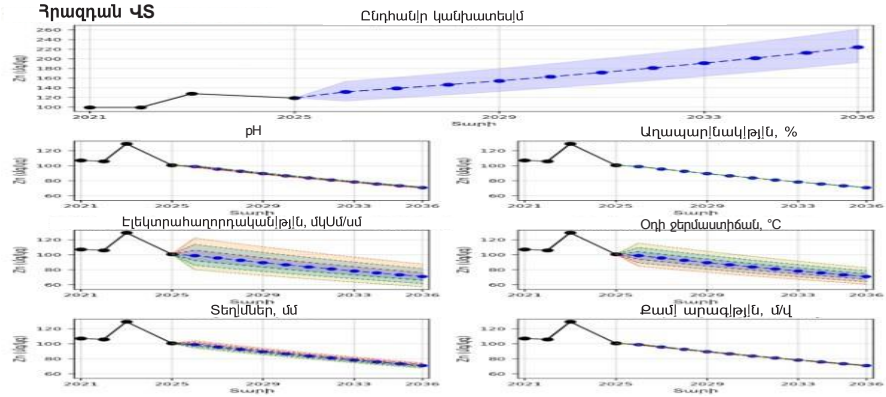
Նկ. 4 Հողի և այն ոռոգող ջրի նմուշներում ծանր մետաղների պարունակությունների կոռելացիոն կախվածության քարտեզ



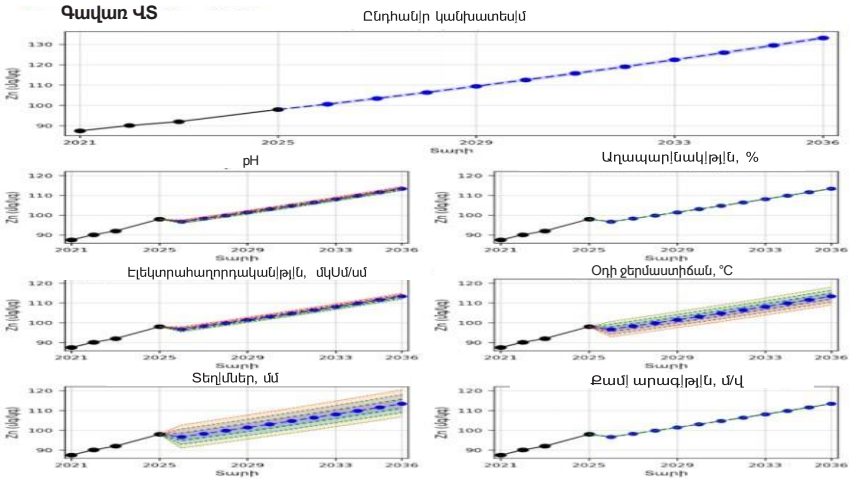
Նկ. 5 Ուսումնասիրվող ԾՄ պարունակությունների երկարաժամկետ կանխատեսումը Հրազդանի, Գավառի և Մարտունու ՎՏ հողերում 2026-2036 թթ. պարզ ժամանակային գծային մոդելո

Մասնավորապես, V, Cu և Zn տարրերի դեպքում արձանագրվել է դրական կոռելացիա, ինչը վկայում է այն մասին, որ հողում այդ տարրերի պարունակությունների փոփոխությունները որոշակիորեն համընկնում են ոռոգման ջրում դրանց պարունակության փոփոխությունների հետ: Մոդելավորման արդյունքներով դետերմինացիայի գործակիցը կազմել է R^2=0,9945, իսկ միջին սխալը՝ մոտ 5,5% [3, 4, 6] : ԾՄ պարունակությունների երկարաժամկետ փոփոխությունների գնահատման համար իրականացվել է տարածաժամանակային կանխատեսում 2026-2036թթ. ժամանակահատվածի համար [10, 11]: Կանխատեսման ընդհանուր արդյունքները ներկայացվել են ըստ ուսումնասիրվող տարրերի և ՎՏ՝ Հրազդան, Գավառ և Մարտունի (նկ. 5):

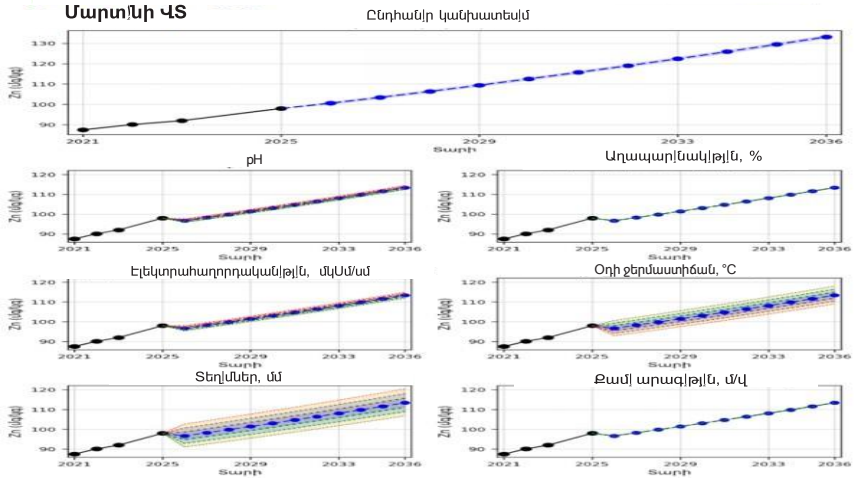
Նկարում ներկայացված են 2021-2025թթ. փաստացի տվյալների հիման վրա կառուցված երկարաժամկետ միտումները և 2026-2036թթ. կանխատեսվող փոփոխությունները: Ստացված գրաֆիկները ցույց են տալիս, որ տարրերի կանխատեսվող վարքը միատեսակ չէ. Cu, Pb և As տարրերի համար հիմնականում բնորոշ է նվազման միտումը, մինչդեռ Ba, V, Mn, Cr և Zn տարրերի դեպքում նկատվում է աճի ուղղվածություն: Բազմագործոն երկարաժամկետ կանխատեսման բնութագրական օրինակներ են Հրազդանի (նկ. 6), Գավառի (նկ. 7) և Մարտունու (նկ. 8) ՎՏ հողերում Zn պարունակության փոփոխության գնահատումները: Գրաֆիկի վերին մասում ներկայացված է Zn ընդհանուր երկարաժամկետ կանխատեսումը, որը ցույց է տալիս 2026-2036 թթ. աճի միտում: Ստորին գրաֆիկներում ներկայացված են pH, աղապարունակության, ԷՀ, օդի ջերմաստիճանի, տեղումների և քամու արագության պայմաններում կանխատեսվող փոփոխությունները, որոնք ցույց են տալիս, որ Zn պարունակության փոփոխությունը զգայուն է միջավայրի առանձին գործոնների նկատմամբ:



Նկ. 6 Հրազդանի ՎՏ հողանմուշներում Zn պարունակության փոփոխության երկարաժամկետ կանխատեսումը 2026-2036 թթ.՝ պարզ ժամանակային և բազմագործոն գծային մոդելներով



Նկ. 7 Գավառի ՎՏ հողանմուշներում Zn պարունակության փոփոխության երկարաժամկետ կանխատեսումը 2026-2036 թթ.՝ պարզ ժամանակային և բազմագործոն գծային մոդելներով



Նկ. 8 Մարտունու ՎՏ հողանմուշներում Zn պարունակության փոփոխության երկարաժամկետ կանխատեսումը 2026-2036 թթ.՝ պարզ ժամանակային և բազմագործոն գծային մոդելներով

Այս արդյունքները վկայում են, որ Zn կանխատեսվող դինամիկան չի սահմանափակվում միայն ժամանակային միտումով, այլ պայմանավորված է նաև հողի ֆիզիկաքիմիական և բնակլիմայական պայմանների ազդեցությամբ:

ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

Ուսումնասիրության արդյունքում ստացված արդյունքները թույլ են տալիս անել հետևյալ եզրակացությունները.

1. Հրազդանի, Գավառի և Մարտունու ՎՏ հարակից հողանմուշներում ԾՄ պարունակությունների վերլուծությամբ բացահայտվել է դրանց արտահայտված տարածաժամանակային անհամասեռությունը: Աղտոտվածության առավել նկատելի դրսևորումները բնորոշ են Հրազդանի ՎՏ դիտակետերին, իսկ Գավառի և Մարտունու հողանմուշներում դրանք հիմնականում ավելի թույլ են արտահայտվել: Աղտոտվածության ձևավորման մեջ առավել նշանակալի դեր են ունեցել Pb, As, Zn և Cu տարրերը:

2. Ըստ վտանգավորության դասերի կատարված գնահատումը ցույց է տվել, որ Sr, V և Ba տարրերը հետազոտության տարբեր փուլերում հաճախ գերազանցել են նորմատիվային արժեքները, իսկ Mn դրսևորել է փոփոխական վարք: Միջին վտանգավորության դասի տարրերի հիմնական շեղումները պայմանավորված են եղել Cu, մինչդեռ Cr չի հասել նորմատիվային մակարդակին: Բարձր վտանգավորության դասի տարրերիից Pb և As առավել բարձր պարունակությունները գրանցվել են 2021թ., հատկապես Հրազդանի դիտակետերում, իսկ Zn ամբողջ ուսումնասիրության ընթացքում պահպանել է ՍԹԿ բարձր մակարդակ:

3. Հողի ֆիզիկաքիմիական ցուցանիշների ուսումնասիրությամբ պարզվել է, որ ԷՀ և աղապարունակությունը առավել փոփոխական պարամետրերն են, մինչդեռ pH հիմնականում պահպանվել է չեզոքից թույլ հիմնային միջակայքում: Այս ցուցանիշների փոփոխությունները կապված են ԾՄ շարժունակության և միգրացիոն ակտիվության փոփոխման հետ, սակայն դրանց ազդեցությունը կախված է տվյալ տարածքի տեղային պայմաններից:

4. Կոռելացիոն վերլուծությամբ հաստատվել է, որ ԾՄ պարունակությունների և հողի ֆիզիկաքիմիական ցուցանիշների միջև կապերը տարբեր դիտակետերում և տարիներին միատեսակ չեն դրսևորվել՝ տարբերվելով թե՛ ուժգնությամբ, թե՛ ուղղվածությամբ: ԷՀ դեպքում առավել արտահայտված կապերը հիմնականում ձևավորվել են նույն տարածաշրջանի դիտակետերի միջև, իսկ աղապարունակության և pH դեպքում արձանագրվել են ինչպես դրական, այնպես էլ բացասական փոխկապակցվածություններ: Սա հաստատում է, որ ԾՄ կուտակումը և միգրացիան ունեն բազմագործոն բնույթ:

5. Երկրաբնապահպանական գործակիցների հաշվարկով գնահատվել են ԾՄ կուտակման, ցրման և հողերի աղտոտվածության մակարդակները: Կուտակման և ցրման գործակիցները հիմնականում գտնվել են թույլից մինչև միջին արտահայտվածության սահմաններում: 2021թ. Հրազդանի և Գավառի ՎՏ մի շարք դիտակետերում արձանագրվել է միջին մակարդակի աղտոտվածություն (Z_c=18,04-32,02), որը հետագա տարիներին նվազել է և

հիմնականում անցել թույլ աղտոտվածության մակարդակի: Առավել բարձր երկրակուտակման դասերը կապված են եղել Pb և As տարրերի հետ:

6. «Հող-ջուր» համակարգում իրականացված ռեգրեսիոն մոդելավորմամբ պարզվել է, որ հողանմուշներում ԾՄ պարունակությունների, սեզոնային և տարածքային գործոնների հիման վրա հնարավոր է գնահատել ոռոգման ջրերում դրանց ընդհանուր պարունակությունը: Min-Max նորմալացման և գծային ռեգրեսիայի կիրառմամբ կառուցված մոդելը ցուցաբերել է բարձր կանխատեսումային ճշգրտություն՝ R^2=0,9945 և միջին սխալ՝ 5,5%, ինչը հաստատում է մոդելի կիրառելիությունը միգրացիոն ռիսկերի վաղ գնահատման համար:

7. Երկարաժամկետ կանխատեսումային մոդելավորումը ցույց է տվել, որ սահմանափակ ելակետային տվյալներով հնարավոր է գնահատել ԾՄ պարունակությունների փոփոխության ընդհանուր միտումները: 2026-2036թթ. Pb, As և Cu տարրերի համար առավել բնորոշ է նվազման միտումը, Zn դեպքում՝ թույլ աճ, իսկ Sr, Ba, V, Mn և Cr տարրերի կանխատեսվող վարքը փոփոխվում է մոդելում ներառված ֆիզիկաքիմիական ու կլիմայական գործոններից կախված:

Ատենախոսության թեմայով հրատարակված աշխատանքների ցանկ

1. Sukiasyan A., **Yesayan P.** Modelling the spatio-temporal migration of some heavy metals in the water-soil-plant chain. PLANTMETALS: Trace Metal Metabolism in Plants. Book of Abstracts. Annual Meeting 2024. Ljubljana, Slovenia, September 17-20, 2024.
2. Sukiasyan A., **Yesayan P.**, Ulikyan A., Khanamiryan Z. Applications of Machine Learning to Ecological Modeling with Small Database. Transformation of Management Theory and Practice in the XXI Century. 2025: 301-310.
3. Sukiasyan A., **Yesayan P.**, Kirakosyan A., Ghazaryan A., Simonyan G. Detection of seasonal changes in heavy metal concentrations in the soil-irrigation water system using machine learning. Scientific Proceedings of Vanadzor State University. Natural and Exact Sciences. 2025. (1): 55-67.
4. Sukiasyan A. R., **Yesayan P. A.**, Khanamiryan Z. G., Kirakosyan A. A. Predicting concentration change of some TMs in soil-water ecosystem using machine learning. Proceedings of Yerevan State University. Geology and Geography. 2025. 59(2): 574-583.
5. Avalyan R. E., Atoyants A. L., Sukiasyan A. R., Kirakosyan A. A., **Yesayan P. A.**, Aroutiounian R. M. Assessment of the Condition and Mutagenic Potential of Arable Soils Based on the Soil-Plant System. Theoretical and Applied Ecology. 2025. (3): 171-177. doi: 10.25750/1995-4301-2025-3-171-177.

6. **Есаян П.** Пространственно-временные тенденции и прогноз содержания некоторых химических элементов в почвах Армении. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Экология промышленных городов». 2025: 49-50.
7. **Есаян П. А.** Оценка степени загрязнения почв переходными металлами с применением алгоритмов искусственного интеллекта (на примере некоторых территорий Армении). Сборник статей III Международной научно-практической конференции «Современные тенденции научных исследований». 2025: 579-584.
8. Kirakosyan A., Khanamiryan Z., **Yesayan P.**, Aslikyan M., Galstyan A., Sukiasyan A. Forecasting the Spatiotemporal Dynamics of Trace-Element Concentrations in Soil Based on Multi-Year Monitoring. Biogeosystem Technique. 2025. 12(2): 63-70. doi: 10.13187/bgt.2025.2.63.
9. **Yesayan P.** Short-Term Forecasting of Heavy Metal Concentrations in Soil: A Case Study of Some Regions of Armenia. Biogeosystem Technique. 2025. 12(2): 98-103. doi: 10.13187/bgt.2025.2.98.
10. Sukiasyan A. R., Khanamiryan Z. G., **Yesayan P. A.**, Kirakosyan A. A. Nature-based parameters for monitoring and restoring soil cover under different pollution conditions. The Annual Meeting of the SUSTAIN Project (CA22144), 18-19 May 2026, Viseu, Portugal. Abstract book, 32-33.
11. Сукиасян А. Р., Ханамирян З. Г., **Есаян П. А.**, Киракосян А. А. Сравнительный анализ краткосрочных и долгосрочных прогнозов миграции некоторых тяжелых металлов в почвах различных регионов Армении. Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XXVII Международной научно-практической конференции. М.: РУДН, 2026, 387-396.

ЕСАЯН ПАТРИК АРАЕВИЧ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МИГРАЦИЯ РЯДА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

РЕЗЮМЕ

Тяжелые металлы (ТМ) относятся к числу устойчивых загрязнителей окружающей среды, которые могут накапливаться в верхнем слое почвы и участвовать в процессах вторичного загрязнения. В условиях антропогенного воздействия их уровень и миграционные пути зависят не только от природных геохимических особенностей территории, но и влиянием промышленных, энергетических, транспортных, сельскохозяйственных и климатических факторов. Поэтому для выявления экологических рисков и улучшения системы мониторинга

важно провести комплексную оценку пространственно-временной миграции ТМ в почвах.

Цель этого исследования - определить современное экологическое состояние почв в административных территорий (АТ) Разданской, Гаварской и Мартунинской в Республике Армения, изучить особенности загрязнения ТМ и разработать, а также апробировать метод прогнозирования их пространственно-временной миграции с использованием алгоритмов машинного обучения (МО). Для достижения цели были предложены и решены следующие задачи: (1) Анализ известных подходов к оценке накопления и пространственно-временной миграции ТМ в верхнем слое почв; (2) Изучение особенностей миграции ТМ под влиянием природно-климатических, физико-химических и антропогенных факторов; (3) Оценка экологического риска на основе геоэкологических показателей загрязнения; (4) Разработка математической модели пространственно-временной миграции ТМ с применением алгоритмов МО и оценка ее достоверности на основе экспериментальных данных; (5) Построение краткосрочного и долгосрочного прогноза изменения содержания ТМ в верхнем слое почв.

В работе исследованы ТМ и металлоиды различных классов опасности, проведены полевые, лабораторные, геоэкологические и статистические исследования, определены физико-химические показатели почв, а также рассчитаны показатели загрязнения и экологического риска. Полученные данные сопоставлены с нормативными значениями и использованы для оценки сезонных и межгодовых изменений содержания исследуемых элементов.

Установлено, что наиболее выраженная изменчивость содержания ТМ характерна для почв Разданской АТ, где формирование загрязнения связано с промышленной и энергетической нагрузкой, техногенным пылеосаждением и особенностями верхнего слоя почв. В почвах Гаварской и Мартунинской АТ изменения в основном имели более локальный характер. Показана значимость Pb, As, Cu и Sr в формировании загрязнения, а также роль pH, засоленности и электропроводности в процессах подвижности и перераспределения металлов.

Разработан и применен прогнозный подход, основанный на оценке взаимосвязей в системе «почва-вода», а также на построении простых временных и многофакторных линейных регрессионных моделей для оценки возможных изменений содержания ТМ на 2026-2036 гг. Моделирование выполнено с применением языков программирования Python и C++. Применение многофакторного подхода позволило учитывать влияние времени, физико-химических свойств почв и климатических параметров на прогнозируемые изменения содержания ТМ.

Научная новизна работы заключается в комплексной геоэкологической оценке почв Разданской, Гаварской и Мартунинской АТ с учетом пространственно-временной динамики ТМ, физико-химических свойств почв и антропогенного воздействия, а также в разработке прогнозного подхода к оценке их дальнейшей миграции.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов для совершенствования экологического мониторинга, выявления территорий с повышенным риском накопления ТМ и обоснования природоохранных мероприятий. Разработанный подход можно применить при оценке загрязнения почв в других регионах Республики Армения.

Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 11 научных публикациях.

YESAYAN PATRIK ARA

SPATIOTEMPORAL MIGRATION OF A NUMBER HEAVY METALS IN THE ENVIRONMENT INDUCED BY ANTHROPOGENIC IMPACT

SUMMARY

Heavy metals (HMs) are persistent environmental pollutants that accumulate in the upper soil layer and undergo secondary redistribution. Under anthropogenic influence, their concentrations and migration behaviour are determined not only by the area's natural geochemical characteristics but also by industrial, energy-related, transport, agricultural, and climatic factors. Therefore, a comprehensive assessment of the spatiotemporal migration of HMs in soils is crucial for identifying ecological risks and improving monitoring systems.

This study aims to assess the current ecological condition of soils in the Hrazdan, Gavar, and Martuni administrative territories (AT) of the Republic of Armenia, identify the specific features of HM contamination, and develop and test an approach for predicting their spatiotemporal migration using machine learning (ML) algorithms. To achieve this aim, the following tasks were proposed and addressed: (1) analysis of existing approaches to assessing the accumulation and spatiotemporal migration of HMs in the upper soil layer; (2) investigation of the specific features of heavy metal migration under the influence of natural-climatic, physicochemical, and anthropogenic factors; (3) assessment of ecological risk using geoecological pollution indicators; (4) development of a mathematical model for the spatiotemporal migration of HMs using ML algorithms, and evaluation of its reliability using experimental data; and (5) construction of short-term and long-term forecasts of changes in heavy metal content in the upper soil layer.

The study examined HMs and metalloids across different hazard classes. Field, laboratory, geoecological, and statistical investigations were carried out; the physicochemical properties of soils, including pH, salinity, and electrical conductivity, were determined; and pollution and ecological risk indicators were calculated. The data

were compared with regulatory values and used to assess seasonal and interannual changes in the concentrations of the studied elements.

It was established that the most pronounced variability in HM content is characteristic of soils in the Hrazdan AT, where pollution formation is associated with industrial and energy-related pressure, technogenic dust deposition, and the characteristics of the upper soil layer. In the soils of the Gavar and Martuni AT, the changes were largely localised. The significance of Pb, As, Cu, and Sr in pollution formation was demonstrated, as was the role of pH, salinity, and electrical conductivity in the mobility and redistribution of metals.

A predictive approach was developed and applied, based on an assessment of relationships in the "soil-water" system and on the construction of simple time-series and multifactor linear regression models to estimate possible changes in HM content for 2026-2036. The model calculations were performed using software tools developed in Python and C++. The application of the multifactor approach enabled the influence of time, soil physicochemical properties, and climatic parameters on the predicted changes in HM content to be accounted for.

The scientific novelty of the work lies in the comprehensive geoecological assessment of soils across the Hrazdan, Gavar, and Martuni AT, which accounts for the spatiotemporal dynamics of HMs, soil physicochemical properties, and anthropogenic impacts, and in the development of a predictive approach to assess their subsequent migration.

The practical significance of the work is determined by the potential to use the results obtained to improve environmental monitoring, identify areas at increased risk of HM accumulation, and substantiate environmental protection measures. The developed approach can be applied to assess soil contamination in other regions of the Republic of Armenia.

The main provisions and results of the dissertation are presented in 11 scientific publications.