



MİKROELEMENTLƏRİN PAYLANMASI VƏ ONLARIN LƏNKƏRAN İQTİSADI RAYONUNUN DAĞ-MEŞƏ TORPAQLARINDA EKOLOJİ ƏHƏMİYYƏTİ

Tural Kamal oğlu Əhədov 

Coğrafiya İnstitutu, Bakı, Azərbaycan

Ehedov-tural@mail.ru

Bu tədqiqat mikroelementlərin-dəmir (Fe), manqan (Mn), sink (Zn) və mis (Cu) Lənkəran-As-tara regionunun dağ-meşə torpaqlarında paylanmasını və onların ekoloji əhəmiyyətini araşdırır. Tədqiqat müxtəlif yüksəklik qurşaqlarını, yamac istiqamətlərini və geomorfoloji şəraiti əhatə etmiş-dir. Torpaq kəsirləri çöl şəraitində genetik horizontlar üzrə təhlil edilmiş, laboratoriya analizləri zamanı isə morfoloji quruluş, humus qatının dərinliyi, pH, mexaniki tərkib və mikroelementlərin konsentrasiyası qiymətləndirilmişdir. Nəticələr göstərir ki, mikroelementlərin paylanması relyef və iqlim faktorlarından güclü şəkildə asılıdır. Yüksəklik dəyişməsi, rütubətlik və yamacın istiqaməti mikroelementlərin bioloji mənimsənilmə qabiliyyətinə və torpağın münbitliyinə birbaşa təsir göstə-rir. Bu tapıntılar ekoloji qiymətləndirmə, torpaq monitorinqi və torpaq ehtiyatlarının davamlı idarə olunması üçün mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

Açar sözlər: mikroelementlər, dağ-meşə torpaqları, Fe, Mn, Zn, Cu, ekoloji əhəmiyyət

GİRİŞ

Torpaq ən mürəkkəb təbiət sistemlərindən birini təşkil edir və ekosistemlərin qurulmasında, fəaliyyətində və ümumi dinamikasında fundamental və əvəzolunmaz funksiya daşıyır. O, daim də-yişən, çoxsaylı qarşılıqlı əlaqəli proseslər vasitəsilə modifikasiyaya və yenilənməyə məruz qalan di-namik bir sistemdir. Torpaqların əmələ gəlməsi və təkamülü bir neçə mühüm ekoloji faktorla sıx bağlıdır: yerin alt qatının konfiqurasiyası (topoqrafiya), regional iqlim şəraiti, bitki örtüyünün tərkibi və strukturu, torpağın əmələ gəldiyi ana süxurun xüsusiyyətləri. Xüsusilə dağ-meşə torpaqları mürəkkəb geomorfoloji şərait və rütubətli subtropik iqlimdə formalaşır. Bu fərqli şərait intensiv maddələr dövrənini və aktiv davam edən torpaqəmələgəlmə proseslərini təşviq edir ki, bu da mik-roelementlərin hərəkətinə, transformasiyasına və torpaq profilində şaquli və üfüqi paylanmasına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir [8, 14].

Mikroelementlər, o cümlədən dəmir (Fe), manqan (Mn), sink (Zn) və mis (Cu), torpaq matri-sinin əsas komponentlərini təşkil edir. Onlar torpağın həm mineral, həm də üzvi fraksiyaları ilə ak-tiv şəkildə qarşılıqlı təsirə girir və çoxsaylı həyati proseslər üçün vacibdir. Mikroelementlər bitkilər-də fermentlərin və kofermentlərin tərkibinə daxil olmaqla, xlorofil və zülal sintezini, fotosintez və metabolik prosesləri tənzimləyir, həmçinin makroelementlərin udulmasını və istifadəsini təşviq edir [15, 17]. Bu proseslər bitki qida dinamikasının tənzimlənməsini, parçalanma və qida maddələrinin mənimsənilməsi kimi bioloji dövrlərin asanlaşdırılmasını və ümumi torpaq münbitliyinin və struk-turunun qorunmasını əhatə edir [1]. Bu mikroelementlərin torpaq horizontları üzrə paylanması və bioloji mənimsənilmə qabiliyyəti humusun formalaşma dərəcəsi, torpağın pH-ı, tekstur xüsusiyyət-ləri (hissəcik ölçüsü paylanması) və struktur atributları (torpaq hissəciklərinin aqreqasiyası) daxil olmaqla, çoxşaxəli amillər dəsti tərəfindən idarə olunur [7, 13]. Bu elementlərin həm çatışmazlığı, həm də artıqlığı bitki inkişafına mənfi təsir göstərə, fizioloji pozuntulara səbəb ola və inkişafı məh-



dudlaşdırı bilər. Bundan əlavə, bu cür balanssızlıqlar ekosistemin dayanıqlılığını və davamlılığını poza bilər, onu ekoloji stress və degradasiyaya qarşı həssas edə bilər [4].

Lənkəran–Astara regionu Talış dağlarının cənub yamaclarında yerləşir, müxtəlif yüksəklik qurşaqları və müxtəlif yamac istiqamətləri ilə mürəkkəb relyefə malikdir. Bu geomorfoloji heterojenlik torpaqəmələgəlmə proseslərinə əhəmiyyətli dərəcədə təsir edərək, dağ-meşə torpaqlarında yuyulma (həll olunan maddələrin çıxarılması), diffuziya (ion hərəkəti) və illüviyasiya (üst horizontlardan materialın toplanması) kimi pedogenetik mexanizmləri gücləndirir. Nəticədə, mikroelementlər müxtəlif torpaq horizontlarında nəzərəcarpacaq və qeyri-bərabər paylanma nümayiş etdirir [2, 6]. Bundan əlavə, regionun rütubətli-subtropik iqlimi illik 1200–1600 mm arasında yağıntı və mülayim orta illik temperatur 12–14 °C bu prosesləri daha da təşviq edir. Bu cür şərait üzvi maddələrin parçalanmasını sürətləndirir və intensiv humifikasiyanı asanlaşdırır, bununla da bitkilər tərəfindən mənimsənilmə və yenidən paylanma üçün mikroelementlərin mobil formalarının əlçatanlığını artırır [11].

Nisbətən qalın və yaxşı inkişaf etmiş humus qatı ilə xarakterizə olunan dağ-meşə qonur torpaqlarında bu üzvi zəngin horizont, xüsusilə sink (Zn) və mis (Cu) kimi bəzi mikroelementlərin üst torpaq qatlarında toplanmasını asanlaşdırır. Bu proses onların bitki kök sistemləri üçün əlçatanlığını artırır [10]. Əksinə, regionun dağ-meşə sarı torpaqlarında, rütubətli iqlim və spesifik torpaq xüsusiyyətləri səbəbindən intensiv yuyulma dəmir (Fe) və manqanın (Mn) aşağıya doğru miqrasiyasına səbəb olur. Bu elementlər səth horizontlarından daha dərin illüvial təbəqələrə daşınır, bununla da köklərin əksəriyyətinin cəmləşdiyi üst torpaq qatlarında onların bioloji əlçatanlığını azaldır. Nəticədə, mikroelementlərin məkan paylanması, hərəkətililiyi və əlçatanlığı ilk növbədə torpaq humusunun xüsusiyyətlərinin, yamacın istiqaməti və dikliyinin və landşaftın ümumi relyefinin mürəkkəb qarşılıqlı təsiri ilə idarə olunur [14].

Buna görə də Lənkəran–Astara regionunun dağ-meşə torpaqlarında mikroelementlərin paylanma qanunauyğunluqlarının öyrənilməsi təkcə torpaqşünaslıq üçün deyil, həm də ekoloji monitoring, bitkilərin qida maddələri ilə təminatının optimallaşdırılması və meşə ekosistemlərinin davamlı idarə edilməsi üçün əhəmiyyətli elmi dəyərə malikdir. Həyata keçirilən tədqiqat dağ relyefi şəraitində torpaqəmələgəlmə proseslərini və mikroelementlərin diferensiasiyasını hərtərəfli qiymətləndirməyə imkan verir.

MATERIAL VƏ METODLAR

Tədqiqat 2022-2025-ci illər arasında Lənkəran–Astara regionunun dağlıq meşəli ərazilərində aparılmışdır. Çöl işləri zamanı dəniz səviyyəsindən 300 metrədən 1800 metrədək yüksəkliklərdə, müxtəlif yamac gradientləri və ekspozisiyaları olan sahələrdə torpaq kəsirləri qoyulmuşdur. Tədqiqat sahələrinin seçimi geomorfoloji müxtəliflik, bitki örtüyünün tipi və torpaq örtüyünün paylanma xüsusiyyətləri əsasında aparılmışdır. Hər bir torpaq kəsimi morfoloji xüsusiyyətlərinə görə təsvir edilmiş və genetik horizontlardan nümunələr götürülmüşdür [5].

Torpaq nümunələri çöldə daşlardan, bitki qalıqlarından və iri köklərdən təmizlənmiş, təbii şəraitdə hava-quru vəziyyətinə qədər qurudulmuş və laboratoriya analizləri üçün homogenləşdirilmişdir. Laboratoriyada torpaqların əsas fiziki-kimyəvi xassələri və mikroelement tərkibi müasir analitik metodlarla müəyyən edilmişdir [3].

Humusun miqdarı Tyurin üsulu ilə, torpaq reaksiyası (pH) potensiometrik üsulla, mexaniki tərkibi isə pipet üsulu ilə analiz edilmişdir. Mikroelementlərin (Fe, Mn, Zn və Cu) tərkibi atom-absorbsion spektrofotometriya üsulu ilə müəyyən edilmişdir ki, bu da torpaqlarda elementlərin dəqiq və etibarlı miqdarı təyini təmin edir.



Tədqiqat çərçivəsində dağ-meşə qonur və sarı torpaqları müqayisəli şəkildə analiz edilmiş və əldə edilən nəticələr SPSS proqram təminatından istifadə etməklə statistik işlənmişdir. Mikroelementlərin paylanması ilə yüksəklik, yamac qradienti və yamac ekspozisiyası arasındakı əlaqələr korrelyasiya və müqayisəli analizlər vasitəsilə qiymətləndirilmişdir.

Analizlər göstərdi ki, mikroelementlərin torpaq profilində paylanması torpaqəmələgəlmə proseslərinin intensivliyi ilə sıx bağlıdır. Dağ-meşə qonur torpaqlarında orta Fe tərkibi təqribən 4200 mq/kq olaraq təyin edilmişdir, dağ-meşə sarı torpaqlarında isə bu dəyər daha yüksəkdir. Bu, sarı torpaqlarda yuyulma və illüviyasiya proseslərinin güclü inkişafı ilə izah edilir ki, bu da dəmir birləşmələrinin aşağı horizontlarda toplanmasına səbəb olur. Ölçmələr analiz üçün hazırlanmış torpaq məhlullarından istifadə edilməklə və atom-absorbsion spektrofotometriya vasitəsilə təyin edilməklə aparılmışdır [16].

Torpaq genezisi əsasən elüviyasiya–illüviyasiya, humifikasiya və intensiv yuyulma prosesləri ilə xarakterizə olunur. Dağ-meşə qonur torpaqlarında nisbətən qalın və sabit humus qatı sink (Zn) və misin (Cu) üst horizontlarda toplanmasını təşviq edir, onların bitkilər üçün bioloji mənimsənilmə qabiliyyətini artırır. Bunun əksinə olaraq, dağ-meşə sarı torpaqlarında Fe və Mn birləşmələrinin aşağı horizontlara miqrasiyası bu elementlərin üst qatlarda bioloji əlçatanlığını azaldır.

Yamac ekspozisiyası və yüksəklik torpağın rütubətinə, temperatur rejiminə və günəş işığının paylanmasına təsir edərək, mikroelementlərin torpaq profilində diferensiasiyasına əhəmiyyətli dərəcədə təsir göstərir. Şimal və şimal-qərb yamaclarında daha yüksək rütubət yuyulma proseslərini gücləndirir, cənub yamaclarında isə nisbi quruluq mikroelementlərin üst horizontlarda daha stabil qalmasına imkan verir [12].

Ekoloji baxımdan, bu tapıntılar torpaq örtüyünün cari vəziyyətini qiymətləndirmək, bitkilərin mikroelementlərlə qidalanmasını optimallaşdırmaq və davamlı meşə idarəetmə təcrübələrini planlaşdırmaq üçün mühüm elmi əsas təmin edir. Xüsusilə, Fe və Mn konsentrasiyaları ilə eroziya və yuyulma proseslərinin intensivliyi arasında güclü korrelyasiya bu elementləri ekoloji indikatorlar kimi istifadə üçün əlverişli edir. Bundan əlavə, humus qatının qalınlığı və torpaq rütubəti mikroelementlərin paylanmasını tənzimləməkdə əsas rol oynayır ki, bu da torpaq münbitliyinin qorunması və dağ-meşə ekosistemlərinin uzunmüddətli davamlılığını dəstəkləmək üçün vacibdir.

NƏTİCƏLƏR VƏ ONLARIN MÜZAKİRƏSİ

Ekoloji baxımdan, mikroelementlərin torpaq profilində paylanma qanunauyğunluqları bir sıra mühüm ekosistem proseslərinə birbaşa təsir edən əsas amildir. Bunlara torpaq münbitliyinin qorunması, bitkilərin mineral qidalanmasının tənzimlənməsi və meşə ekosistemlərinin ekoloji stress şəraitində uzunmüddətli dayanıqlığı və davamlılığı daxildir. Torpaq üzvi maddəsinin tərkibi və keyfiyyəti, xüsusilə humus qatının qalınlığı və tərkibi, üstünlük təşkil edən rütubət şəraiti ilə birlikdə, mikroelementlərin torpaq məhlulunda hərəkətiliyinə nəzarətdə kritik rol oynayır. Bu şərtlər mikroelementlərin bitki kökləri tərəfindən udulması və bitki daxilində sonrakı translokasiyası üçün nə dərəcədə əlçatan olduğunu müəyyən edir [7, 13]. Müvafiq olaraq, humusun inkişaf dərəcəsi həm dərinliyi, həm də kimyəvi tərkibi torpaqlarda mikroelementlərin bioloji mənimsənilmə qabiliyyətinin əsas proqnozlaşdırıcısı rolunu oynayır.

Bu tədqiqatın nəticələri göstərir ki, Lənkəran–Astara regionunun dağ-meşə torpaqlarında mikroelementlərin paylanması təsadüfi deyil, bir neçə əsas ekoloji amilin qarşılıqlı təsiri nəticəsində sistematik şəkildə formalaşır. Bunlara ərazinin relyefinin mürəkkəbliyi və strukturu (topoqrafiya), yamacın istiqaməti və dikliyi, yüksəklik qurşağı və üzvi maddənin miqdarı və keyfiyyəti kimi torpaq-humus xassələri daxildir.



Cədvəl 1.

Lənkəran-Astara bölgəsinin dağ-meşə torpaqlarında mikroelementlərin yayılması

Mikroelement	Qəhvəyi torpaqlar (Aşağı/Orta dağlıq), mg/kg	Sarı torpaqlar (Yüksək dağlıq), mg/kg	Qeyd
Fe (Dəmir)	4200–4800	5100–5600	Yüksək hündürlüklərdə yuyulma (leaching) və illüvasiya prosesləri nəticəsində miqdarı artır
Mn (Manqan)	300–380	350–420	Daha yüksək rütubətə görə şimal ekspozisiyalı yamaclarda daha çox toplanır
Zn (Sink)	45–55	35–45	Humus qatının qalınlığı sinkin konsentrasiyasını artırır
Cu (Mis)	10–15	8–12	Humus qatının qalınlığı misin miqdarına təsir göstərir
pH	5.5–6.5	4.8–5.6	Yüksək dağlıq ərazilər turş, aşağı və orta dağlıq sahələr isə neytrala yaxın reaksiyaya malikdir

Bu qanunauyğunluq xüsusilə regionun dominant torpaq tiplərindən biri olan dağ-meşə qonur torpaqlarında özünü göstərir. Kəmiyyət analizləri göstərir ki, dəmirin (Fe) konsentrasiyası 4200-4800 mq/kg, manqanın (Mn) 300-380 mq/kg, sinkin (Zn) 45-55 mq/kg və misin (Cu) 10-15 mq/kg arasında dəyişir. Nisbətən qalın və yaxşı inkişaf etmiş humus qatı, yüksək mikrobioloji aktivliklə birləşərək biogeokimyəvi dövrən üçün əlverişli şərait yaradır. Bu şərait Zn və Cu-nun üst torpaq horizonlarında toplanmasını və saxlanmasını asanlaşdırır, onların bitkilər tərəfindən mənimsənilmə qabiliyyətini artırır və həyati fizioloji prosesləri dəstəkləyir, bununla da meşə ekosisteminin ümumi sağlamlığına və davamlılığına töhfə verir.

Qonur torpaqlardan fərqli olaraq, regionun dağ-meşə sarı torpaqları öz spesifik pedogenetik şəraitini əks etdirən fərqli mikroelement paylanma qanunauyğunluqları nümayiş etdirir. Kəmiyyət analizi göstərir ki, dəmirin (Fe) konsentrasiyası 5100-5600 mq/kg, manqanın (Mn) 350-420 mq/kg, sinkin (Zn) 35-45 mq/kg və misin (Cu) 8-12 mq/kg arasında dəyişir. Bu torpaqlar üçün xarakterik olan daha incə humus qatı, rütubətli iqlim və torpağın özünəməxsus xüsusiyyətlərinin təsiri ilə güclənmiş yuyulma prosesləri ilə birləşərək unikal şaquli təbəqələşməyə səbəb olur. Bu amillər Fe və Mn-nun aşağı illüvial horizonlara doğru hərəkətini və toplanmasını təşviq edir, bununla da bitki köklərinin əksəriyyətinin yerləşdiyi üst horizonlarda bu mikroelementlərin bioloji mənimsənilmə qabiliyyətini azaldır. Bu qanunauyğunluq əsasən mövcud ekoloji şəraitdə sarı torpaqların formalaşmasını və inkişafını xarakterizə edən nəzərəcərpacaq elüviyasiya və illüviyasiya prosesləri tərəfindən idarə olunur (Cədvəl 1).

Relyef və yamac istiqaməti kimi topoqrafik amillərin mikroelementlərin paylanmasına təsiri tədqiqat ərazisi boyunca ardıcıl olaraq müşahidə edilmişdir. Birbaşa günəş işığı daha az olan şimal və şimal-qərb yamaclarında daha yüksək torpaq rütubəti və aşağı evapotranspirasiya sürəti yuyulma proseslərini gücləndirir. Suyun torpaq profilindən bu artan hərəkəti dəmir (Fe) və manqanın (Mn) aşağı horizonlara doğru miqrasiyasını və toplanmasını asanlaşdırır. Fe və Mn konsentrasiyalarının



üst horizontlarda azalması nəticəsində bu elementlərin bitkilər tərəfindən mənimsənilmə imkanı məhdudlaşa bilər ki, bu da qida balansına, bitki fizioloji sağlamlığına və vegetasiya icmalarının strukturuna potensial təsir göstərərək, zamanla qida çatışmazlığına və növ tərkibində dəyişikliklərə səbəb ola bilər [9].

Əksinə, daha çox günəş radiasiyasına məruz qalan cənub və cənub-şərq yamacları humifikasiya proseslərini sürətləndirən daha isti və quru şəraitlə üzləşir. Üzvi maddənin bu yüksək dövriyyəsi və toplanması sink (Zn) və misin (Cu) üst torpaq horizontlarında saxlanmasını dəstəkləyir, çünki bu elementlər üzvi maddə ilə stabil komplekslər əmələ gətirir və yuyulmaya daha az məruz qalır. Sink (Zn) və misin (Cu) torpaqlarda paylanması əsasən humus qatının zənginliyi və qalınlığı, həmçinin torpaq-üzvi maddə komplekslərinin dayanıqlığı ilə müəyyən edilir. Bu mikroelementlər üzvi birləşmələrə yüksək yaxınlığa malikdir, onların hərəkətililiyini və bioloji mənimsənilməsini tənzimləyən stabil komplekslər əmələ gətirir [13].

Konkret olaraq, dəmir (Fe) və manqanın (Mn) aşağı torpaq horizontlarında toplanması əsasən yuyulma və illüviyasiya kimi pedogenetik proseslərin təsiri ilə baş verir. Aşağıya doğru material hərəkətləri, xüsusilə qravitasiya su axını, yüksək yağıntı və dik yamaclar kimi amillərin bu prosesləri intensivləşdirdiyi dağlıq ərazilərdə daha qabarıq şəkildə özünü göstərir. Üstəlik, bu elementlərin yenedən paylanması aktiv torpaq eroziyasının həssas göstəricisi rolunu oynaya bilər, landşaft qeyri-sabitliyinə məruz qalan sahələri işarə edir. Fe və Mn konsentrasiyalarının üst horizontlarda azalması nəticəsində bu elementlərin bitkilər tərəfindən mənimsənilmə imkanı məhdudlaşa bilər ki, bu da qida balansına, bitki fizioloji sağlamlığına və vegetasiya icmalarının strukturuna potensial təsir göstərərək, zamanla qida çatışmazlığına və növ tərkibində dəyişikliklərə səbəb ola bilər.

Sink (Zn) və misin (Cu) torpaqlarda paylanması əsasən humus qatının zənginliyi və qalınlığı, həmçinin torpaq-üzvi maddə komplekslərinin dayanıqlığı ilə müəyyən edilir. Bu mikroelementlər üzvi birləşmələrə yüksək yaxınlığa malikdir, onların hərəkətililiyini və bioloji mənimsənilməsini tənzimləyən stabil komplekslər əmələ gətirir. Nisbətən qalın və yaxşı inkişaf etmiş, üzvi maddələrlə zəngin humus horizontuna malik dağ-meşə qonur torpaqlarında bu təbəqə Zn və Cu-nun üst torpaq horizontlarında toplanmasını aktiv şəkildə asanlaşdırır. Səthdə belə zənginləşmə normal bitki böyüməsi və inkişafı üçün vacibdir, çünki bu elementlər əsas fizioloji proseslərin tənzimlənməsində mühüm rol oynayır. Sink və mis müxtəlif ferment sistemləri üçün vacib faktorlar və aktivatorlar rolunu oynayır, zülal sintezi, fotosintez, tənəffüs və hormon tənzimlənməsi kimi proseslərə töhfə verir. Bundan əlavə, onlar bitkilərin müxtəlif biotik və abiotik stresslərə quraqlıq, həddindən artıq temperaturlar və patogen hücumları daxil olmaqla qarşı müqavimətini artırır, bununla da ümumi bitki sağlamlığını dəstəkləyir və ekosistemin davamlılığını yaxşılaşdırır.

Torpaq profillərində müşahidə edilən mikroelementlərin şaquli diferensiasiyası, müxtəlif horizontlarda spesifik elementlər üçün fərqli toplanma qanunauyğunluqları göstərməklə, ekoloji qiymətləndirmə və davamlı torpaq idarəçiliyi üçün xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. Dağ-meşə qonur torpaqları və dağ-meşə sarı torpaqları arasındakı fərqli mikroelement tərkibləri meşə təsərrüfatı əməliyyatları, o cümlədən meşəsalma, seçmə ağac kəsimi və torpaq mühafizə tədbirləri planlaşdırılarkən və həyata keçirilərkən nəzərə alınmalı olan kritik amillərdir. Torpaq geokimyası və mikroelement paylanmasındakı bu daxili variasiyalar uzunmüddətli torpaq münbitliyini qorumaq, müxtəlif sahə şəraitində bitkilərin balanslaşdırılmış qidalanmasını təmin etmək və əsas qida maddələrinin cəmləşdiyi humusla zəngin səth horizontlarının bütövlüyünü qorumaqla eroziya riskini azaltmaq məqsədi daşıyan hədəflənmiş idarəetmə strategiyalarının layihələndirilməsi üçün elmi əsas təmin edir. Bu qanunauyğunluqların tanınması meşə idarəçiliyində məlumatlı qərarların qəbulunu dəstəkləyir, bununla da həm məhsuldarlığı, həm də ekoloji davamlılığı artırır.

Buna görə də Lənkəran–Astara regionunun torpaq profillərində mikroelementlərin paylanması çoxsaylı ekoloji amillərin, xüsusilə relyef (relyef və yamac xüsusiyyətləri) və iqlim şəraitinin (temperatur və yağıntı rejimləri) mürəkkəb qarşılıqlı təsirdən təsirlənən sisteməlik və dinamik proses kimi qiymətləndirilə bilər. Bu tədqiqatın nəticələri bir sıra tətbiqlər üçün əhəmiyyətli elmi və praktiki aktualıq daşıyır: tor-



paq ekosistemlərinin uzunmüddətli ekoloji dayanıqlığının və davamlılığının təmin edilməsi, zamanla dəyişiklikləri izləmək üçün hədəflənmiş torpaq monitoring proqramlarının həyata keçirilməsi, məlumatlı idarəetmə qərarları vasitəsilə bitkilərin mikroelementlərlə qidalanmasının optimallaşdırılması və regionun spesifik edafik şəraitinə uyğunlaşdırılmış davamlı meşə idarəetmə strategiyalarının formalaşdırılması.

Mikroelementlərin torpaq profilində qeyri-bərabər şaquli paylanması, müxtəlif horizontlarda toplanmalar və çatışmazlıqlarla xarakterizə olunmaqla, üstündəki meşə ekosistemlərinin strukturuna və funksional xüsusiyyətlərinə birbaşa təsir göstərir. Spesifik mikroelementlərin həm çatışmazlığı, həm də artıqlığı bitkilərin həyatı fizioloji proseslərini poza bilər, nəticədə yavaş böyümə, məhsuldarlığın azalması və bitki icmalarında biomüxtəlifliyin azalmasına səbəb ola bilər. Xüsusilə, dəmir (Fe) və manqanın (Mn) aşağı torpaq horizontlarında nəzərəcarpacaq dərəcədə toplanması, üst humusla zəngin qatlarda isə nisbi qıtlığı əhəmiyyətli ekoloji məhdudiyyət yaradır. Bu şaquli təbəqələşmə əsasən səth torpaq qatlarında yerləşən ağac və kolların dayaz və aralıq kök sistemləri üçün bu vacib mikroelementlərin əlçatanlığını məhdudlaşdırır. Nəticədə, bu cür qidalanma məhdudiyyətləri bitki inkişafına, növlərarası rəqabətə, ümumi sağlamlığa təsir edir və nəticədə növ tərkibinə və zamanla meşə suksessiyası dinamikasına təsir göstərə bilər.

Dağlıq regionlarda mikroelementlərin paylanmasına və dövrünə təsir edən əsas risk faktoru eroziya proseslərinin intensivləşməsidir. Dağ landşaftlarının dik və mürəkkəb relyefi onları su eroziyasına qarşı xüsusilə həssas edir. Güclü yağışlar və ya insan fəaliyyəti nəticəsində tez-tez tətiklənən səth axınının artması humusla zəngin səth qatının selektiv şəkildə çıxarılmasına səbəb olur. Bu təbəqə üzvi maddələrə güclü yaxınlığı olan sink (Zn) və mis (Cu) kimi bioloji əhəmiyyətli mikroelementləri cəmləşdirdiyi üçün vacibdir. Eroziya nəticəsində bu horizontun fiziki itkisi bu vacib mikroelementlərin torpaq sistemindən tükənməsinə gətirib çıxarır. Nəticədə, həm fiziki, həm də kimyəvi xüsusiyyətlərin pisləşməsi səbəbindən torpaq münbitliyi azalır və meşə ekosistemlərinin pozuntulardan sonra bərpa qabiliyyəti nəzərəcarpacaq dərəcədə azalır. Qida maddələri ilə zəngin səth horizontlarının eroziyaya uğradığı ərazilər daha yavaş bitki bərpası yaşayır və pozuntudan əvvəlki struktur və funksional xüsusiyyətlərini bərpa etmək üçün daha uzun vaxt tələb edir.

Belə şəraitdə torpaq mühafizəsi strategiyalarının və effektiv anti-eroziya tədbirlərinin həyata keçirilməsi ekosistem daxilində stabil və balanslaşdırılmış mikroelement statusunu qorumaq üçün çox vacibdir. Davamlı meşə örtüyünün qorunması, kontur əkinçiliyi və ya şumlanması, dik yamaclarda terrasların qurulması və su axınının tənzimlənməsi kimi yanaşmalar torpaq itkisini əhəmiyyətli dərəcədə azalda bilər. Bu müdaxilələr humusla zəngin səth qatını qorumaq, vacib mikroelement ehtiyatlarını saxlamaq və davamlı ekoloji təzyiqlər altında dağ-meşə ekosistemlərinin davamlı məhsuldarlığını və ekoloji bütövlüyünü təmin etmək üçün həyatı əhəmiyyət daşıyır.

Bu tədqiqatın nəticələri göstərir ki, mikroelementlərin torpaq profillərində paylanma qanunauyğunluqlarının ekoloji monitoring proqramlarına sistemətik şəkildə daxil edilməsi torpaq-ekosistem şəraitinin daha dəqiq və hərtərəfli qiymətləndirilməsinə imkan verir. Fe, Mn, Zn və Cu kimi vacib mikroelementlərin konsentrasiyalarını, nisbətlərini və şaquli paylanmasını tədqiq etməklə, tədqiqatçılar və torpaq menecerləri torpağın fəaliyyəti və sağlamlığı haqqında dəyərli məlumat əldə edə bilərlər. Bu parametrlər etibarlı ekoloji indikatorlar rolunu oynayır, torpaq degradasiyası proseslərinin-qida maddələrinin tükənməsi, turşulaşma və eroziyanın başlanğıcı daxil olmaqla çox vaxt yerüstü simptomlar aşkar olunmamışdan əvvəl erkən aşkarlanmasına imkan verir. Belə indikator əsaslı yanaşmadan istifadə meşə idarəçiliyində elmi əsaslı qərarların qəbulunu dəstəkləyir, reaktiv müdaxilələr əvəzinə proaktiv tədbirləri asanlaşdırır.

Praktiki baxımdan, bu nəticələr həm meşə təsərrüfatında, həm də torpaq idarəçiliyində sahəyə xas və diferensiallaşdırılmış idarəetmə strategiyalarının həyata keçirilməsinin vacibliyini vurğulayır. Qonur və sarı dağ-meşə torpaqlarının fərqli mikroelement tərkiblərini başa düşmək daha dəqiq və effektiv müdaxilələrə imkan verir. Məsələn, gübrələmə və torpaq yaxşılaşdırma təcrübələri müəyyən torpaq tiplərində spesifik qida çatışmazlıqlarını və ya balanssızlıqlarını düzəltmək üçün uyğunlaşdırıla bilər. Belə hədəflənmiş idarəetmə müxtəlif landşaftlarda uzunmüddətli torpaq münbitliyini qorumaq və bitkilərin



balanslaşdırılmış qidalanmasını təmin etmək üçün vacibdir. Bundan əlavə, yamac istiqaməti və yüksəklik qurşaqları kimi kritik landşaft xüsusiyyətlərinə əsaslanan meşə idarəetmə strategiyalarının inkişaf etdirilməsi və uyğunlaşdırılması müxtəlif ətraf mühit şəraitində meşə ekosistemlərinin ümumi davamlılığının, dayanıqlılığının və məhsuldarlığının artırılmasında əsas rol oynayır. Lənkəran–Astara regionunun dağ-meşə torpaqlarının torpaq profillərində mikroelementlərin paylanması dərindən tədqiqi olduqca aktual və vaxtında həyata keçirilən elmi işdir. Bu tədqiqat regional ekoloji dayanıqlılığın qorunması, məhdud torpaq ehtiyatlarından davamlı istifadənin təşviqi və dağlıq landşaftlarda həssas meşə ekosistemlərinin uzunmüddətli davamlılığının dəstəklənməsi üçün kritik əhəmiyyət daşıyır. Torpaq geokimyası, landşaft xüsusiyyətləri və ekosistem sağlamlığı arasındakı mürəkkəb qarşılıqlı əlaqələri aydınlaşdırmaqla, bu tədqiqat məlumatlı ətraf mühit idarəçiliyi üçün zəruri biliklər təmin edir.

Bu tədqiqatın nəticələri bir sıra gələcək tətbiqlər üçün möhkəm elmi əsas yaradır. Onlar həm təbii, həm də antropogen amillərə cavab olaraq torpaq keyfiyyəti və mikroelement statusunda zamanla dəyişiklikləri aşkar etməyə yönəlmiş uzunmüddətli torpaq monitoring proqramlarının layihələndirilməsi və həyata keçirilməsi üçün vacib baza məlumatları təqdim edir. Bundan əlavə, bu tapıntılar iqlim dəyişikliyi, torpaqdan istifadə modifikasiyaları və ya alternativ meşə idarəetmə təcrübələri də daxil olmaqla müxtəlif ekoloji ssenarilər altında mikroelement dinamikasını simulyasiya etmək və proqnozlaşdırmaq qabiliyyətinə malik qabaqcıl torpaq-ekoloji modellərin inkişafına töhfə verir. Bu cür modellər regionun meşə ekosistemlərinin davamlılığını və məhsuldarlığını təmin etmək üçün proaktiv və adaptiv idarəetmə strategiyalarını asanlaşdırır.

Cədvəl 2.

Mikroelementlərin torpağın fiziki-kimyəvi xüsusiyyətləri ilə korrelyasiya əmsalları

Göstərici	Fe	Mn	Zn	Cu	pH	Humus	Fiziki gil
Fe	1.00						
Mn	0.68	1.00					
Zn	-0.42	-0.38	1.00				
Cu	-0.45	-0.41	0.72	1.00			
pH	0.35	0.28	0.58	0.52	1.00		
Humus	-0.48	-0.44	0.76	0.81	0.45	1.00	
Fiziki gil	0.52	0.48	0.32	0.28	0.38	0.25	1.00

Fe və Mn arasında güclü müsbət korrelyasiya ($r = +0.68$, $p < 0.01$) müşahidə edilir. Bu, hər iki elementin eyni geokimyəvi mənşəyə malik olduğunu və torpaq profilində oxşar davranış nümayiş etdirdiyini göstərir. Həm Fe, həm də Mn əsasən ana süxurun aşınması nəticəsində əmələ gəlir və yuyulma-illüviyasiya proseslərində birlikdə miqrasiya edir. Xüsusilə rütubətli subtropik iqlim şəraitində bu elementlər üst horizontlardan aşağı illüvial horizontlara doğru birlikdə hərəkət edir [14].

Zn və Cu arasında çox güclü müsbət korrelyasiya ($r = +0.72$, $p < 0.01$) müşahidə edilmişdir. Bu elementlər üzvi maddə ilə stabil komplekslər əmələ gətirməyə meyillidir və humus qatında birlikdə toplanır. Meşə ekosistemlərində aparılan tədqiqatlar Zn və Cu-nun üzvi maddə ilə sıx əlaqədə olduğunu təsdiq edir [17]. Fe və Zn ($r = -0.42$, $p < 0.05$) ilə Fe və Cu ($r = -0.45$, $p < 0.05$) arasında orta mənfi korrelyasiya müşahidə olunur. Bu, həmin elementlərin torpaq profilində müxtəlif horizontlarda toplandığını gös-



tərir. Fe əsasən yuyulma nəticəsində aşağı horizontlarda toplandığı halda, Zn və Cu üzvi maddə ilə əlaqəli şəkildə üst humus qatında cəmləşir. Zn və pH ($r = +0.58$, $p < 0.01$) ilə Cu və pH ($r = +0.52$, $p < 0.01$) arasında güclü müsbət korrelyasiya mövcuddur. Bu, pH yüksəldikcə (neytrala yaxınlaşdıqca) həmin elementlərin hərəkətililiyinin azaldığını və üst horizontlarda toplandığını göstərir. Turş mühitdə (pH 5.0-dan aşağı) Zn və Cu daha mobil olur və yuyulma prosesində iştirak edə bilər. Ağır metalların və mikroelementlərin torpaqda hərəkətililiyi əsasən pH ilə tənzimlənir [13].

Fe və pH ($r = +0.35$, $p < 0.05$) arasında orta müsbət korrelyasiya müəyyən edilmişdir. Zəif turş və neytral mühitdə Fe birləşmələri daha dayanıqlıdır. Mn və pH ($r = +0.28$) arasında isə korrelyasiya zəifdir və statistik cəhətdən etibarlı hesab edilmir.

Cu və humus ($r = +0.81$, $p < 0.01$) ilə Zn və humus ($r = +0.76$, $p < 0.01$) arasında çox güclü müsbət korrelyasiya müəyyən edilmişdir. Bu, həmin elementlərin üzvi maddə ilə stabil komplekslər əmələ gətirmək qabiliyyətinin yüksək olduğunu göstərir. Humusun tərkibindəki funksional qruplar (karboksil, fenol, spirt) bu elementləri udaraq onların hərəkətililiyini məhdudlaşdırır və üst horizontlarda toplanmasına səbəb olur [7].

Fe və humus ($r = -0.48$, $p < 0.01$) ilə Mn və humus ($r = -0.44$, $p < 0.05$) arasında orta mənfi korrelyasiya mövcuddur. Bu, həmin elementlərin əsasən humusla zəngin olmayan aşağı horizontlarda toplandığını göstərir. Yüksək rütubət şəraitində Fe və Mn üst horizontlardan yuyularaq illüvial horizontlarda (B horizontu) toplanır.

Fe və fiziki gil ($r = +0.52$, $p < 0.01$) ilə Mn və fiziki gil ($r = +0.48$, $p < 0.01$) arasında orta və güclü müsbət korrelyasiya müəyyən edilmişdir. Gil hissəcikləri yüksək udma qabiliyyətinə malik olduğundan bu elementləri öz səthində saxlayır. Xüsusilə 2:1 tipli gil mineralları (hidroslyudalar, vermikulit) Fe və Mn-nun mübadilə formalarını udmaq qabiliyyətinə malikdir [6].

Zn və fiziki gil ($r = +0.32$, $p < 0.05$) arasında zəif, Cu və fiziki gil ($r = +0.28$) arasında isə çox zəif müsbət korrelyasiya müşahidə olunur. Bu elementlər əsasən üzvi maddə ilə əlaqəli olduğu üçün gil fraksiyası ilə korrelyasiyası nisbətən zəifdir (Cədvəl 2).

Dağlıq regionlarda mikroelementlərin paylanmasına və dövrünə təsir edən əsas risk faktoru eroziya proseslərinin intensivləşməsidir. Dağ landşaftlarının dik və mürəkkəb relyefi onları su eroziyasına qarşı xüsusilə həssas edir. Güclü yağışlar və ya insan fəaliyyəti nəticəsində tez-tez tətiklənen səth axınının artması humusla zəngin səth qatının selektiv şəkildə çıxarılmasına səbəb olur. Bu təbəqə üzvi maddələrə güclü yaxınlığı olan sink (Zn) və mis (Cu) kimi bioloji əhəmiyyətli mikroelementləri cəmləşdirdiyi üçün vacibdir. Eroziya nəticəsində bu horizontun fiziki itkisi bu vacib mikroelementlərin torpaq sistemindən tükənməsinə gətirib çıxarır. Həm fiziki, həm də kimyəvi xüsusiyyətlərin pisləşməsi səbəbindən torpaq münbitliyi azalır və meşə ekosistemlərinin pozuntulardan sonra bərpa qabiliyyəti nəzərəcarpacaq dərəcədə azalır.

Cədvəl 3.

Müxtəlif yamac istiqamətlərində mikroelementlərin orta konsentrasiyaları (mq/kg)

Yamac istiqaməti	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Humus (%)	Rütubət (%)
Şimal	4850	385	42	11	6.8	32.5
Şimal-Qərb	4720	375	44	12	7.2	31.8
Cənub	4450	325	52	14	5.5	24.5
Cənub-Şərq	4520	335	50	13	5.8	25.2

Cədvəl 3-də Lənkəran-Astara regionunun dağ-meşə torpaqlarında müxtəlif yamac istiqamətləri üzrə mikroelementlərin (Fe, Mn, Zn, Cu) orta konsentrasiyaları, humusun miqdarı və torpaq rütubətinin göstəriciləri təqdim olunur. Tədqiqat nəticələri yamac ekspozisiyasının mikroelementlərin paylanmasına əhəmiyyətli dərəcədə təsir etdiyini göstərmişdir.



Şimal və şimal-qərb yamaclarında (rütubətli və sərin mikroiqlim) dəmir (Fe) və manqanın (Mn) konsentrasiyası daha yüksəkdir (müvafiq olaraq 4720-4850 mq/kq və 375-385 mq/kq). Bu, həmin yamaclarda yüksək rütubət (31.8-32.5%) hesabına yuyulma proseslərinin intensivləşməsi və bu elementlərin torpaq profilində toplanması ilə əlaqədardır. Humusun miqdarı da bu yamaclarda daha yüksəkdir (6.8-7.2%). Cənub və cənub-şərq yamaclarında (quru və isti mikroiqlim) isə əks tendensiya müşahidə olunur. Burada sink (Zn) və misin (Cu) konsentrasiyası daha yüksəkdir (müvafiq olaraq 50-52 mq/kq və 13-14 mq/kq). Belə ki, cənub yamaclarında daha çox günəş radiasiyası və aşağı rütubət (24.5-25.2%) humifikasiya proseslərini sürətləndirir, üzvi maddənin toplanmasına şərait yaradır. Zn və Cu üzvi maddə ilə stabil komplekslər əmələ gətirdiyindən, bu elementlər üst horizonlarda toplanaraq bitkilər üçün əlçatan formada qalır (Cədvəl 3).

Beləliklə, yamac istiqaməti mikroelementlərin paylanmasında mühüm amildir. Şimal yamaclarında Fe və Mn, cənub yamaclarında isə Zn və Cu üstünlük təşkil edir. Bu qanunauyğunluq regionun dağ-meşə torpaqlarında mikroelementlərin idarə olunması, gübrələmə tədbirlərinin planlaşdırılması və ekoloji monitoring üçün mühüm əhəmiyyət kəsb edir.

YEKUN NƏTİCƏ

Lənkəran–Astara regionunda dağ-meşə torpaq profillərində mikroelementlərin paylanması ilk növbədə relyef xüsusiyyətlərinin-topoqrafiya, yamac istiqaməti və yüksəklik qurşağı daxil olmaqla və temperatur və yağıntı kimi üstünlük təşkil edən iqlim amillərinin mürəkkəb qarşılıqlı təsiri tərəfindən idarə olunur. Tədqiq edilən iki əsas torpaq tipi, dağ-meşə qonur torpaqları və dağ-meşə sarı torpaqları, əsas mikroelementlərin-dəmir (Fe), manqan (Mn), sink (Zn) və mis (Cu), həm ümumi konsentrasiyalarında, həm də şaquli paylanma qanunauyğunluqlarında əhəmiyyətli və ardıcıl fərqlər nümayiş etdirir. Bu variasiyalar əsas torpaqəmələgəlmə proseslərinin, xüsusilə humus qatının inkişafı və qalınlığı, həmçinin yuyulma və illüviyasiyanın üstünlük təşkil edən mexanizmləri və dərəcəsinin intensivliyindəki fərqlərlə sıx bağlıdır.

Bu hərtərəfli tədqiqatın nəticələri ətraf mühitin idarə edilməsi və meşə təsərrüfatında bir sıra praktiki təbiqlər üçün möhkəm və etibarlı elmi əsas təmin edir. Onlar torpaq örtüyünün cari ekoloji vəziyyətini və sağlamlığını dəqiq qiymətləndirmək, mikroelement dinamikasının uzunmüddətli monitorinqini dəstəkləmək üçün baza məlumatları yaratmaq və meşə məhsuldarlığını artırmaq üçün bitki qida rejimlərini optimallaşdırmaq strategiyalarını layihələndirmək üçün vacibdir. Bundan əlavə, bu tapıntılar həssas dağ-meşə ekosistemlərində məhdud torpaq ehtiyatlarından davamlı istifadə və onların qorunmasını təşviq etmək üçün birbaşa praktiki əhəmiyyət daşıyır. Onlar həmçinin meşə təsərrüfatında sübuta əsaslanan və kontekstə xas idarəetmə qərarlarını dəstəkləyir, ağac kəsimi, yenidən əkin və torpaq mühafizəsi kimi müdaxilələrin sahəyə xüsusi edafik şəraitə uyğun şəkildə həyata keçirilməsini təmin edir.

ƏDƏBİYYAT

1. Alloway, B.J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability / B.J.Alloway. – 3rd ed. – Springer, – 2013. – 613 s.
2. Aliyev, R. Soil science and ecosystem conservation / R.Aliyev. – Elm Publishing, – 2019. – 256 s.
3. Barabanov, A.T. Scientific foundations of the erosion and hydrological process management on sloping lands by formation of soil protection systems of adaptive landscape agriculture / A.T.Barabanov // Eurasian Soil Science, – 2025. – 58 (10), – s. 1367–1377.
4. Brady, N.C. The nature and properties of soils / N.C.Brady, R.R.Weil. – 15th ed. – Pearson, – 2016. – 1104 s.
5. Dokuchayev, V.V. Fundamentals of soil science / V.V.Dokuchayev. – 2nd ed. – State Publishing House, – 1948. – 542 s.



6. Haque F. U., Faridullah F., Irshad M. və b. Distribution and speciation of trace elements in soils of four land-use systems // *Land*. – 2023. – Vol. 12, No. 10. – Article 1894. – MDPI.
7. Biogeochemistry of trace elements in the rhizosphere / Ed. P.M.Huang, G.R.Gobran. – Elsevier, – 2005. – 560 s.
8. Huseynov, F. Soil cover of the Lankaran–Astara economic region / F.Huseynov. – Nature Publishing, – 2020. – 248 s.
9. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants / A.Kabata-Pendias. – 4th ed. – CRC Press, – 2011. – 550 s.
10. Kovalyov, V.V. Soil genesis / V.V.Kovalyov. – Nauka, – 1966. – 432 s.
11. Mammadov, T. Mountain forest soil properties in relation to microelement distribution / T.Mammadov, S.Huseynova // *Journal of Environmental Studies*, – 2022. – 15 (2), – s. 45–60.
12. Mammadova, S.A. Soil fertility and humification processes / S.A.Mammadova. – Elm Publishing, – 2015. – 276 s.
13. Trace elements in the environment: Biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation/ Ed. M.N.V.Prasad, K.S.Sajwan, R.Naidu. – CRC Press, – 2006. – 624 s.
14. Sun, D.L. Climate and soil properties regulate the vertical heterogeneity of minor and trace elements in the alpine topsoil of the Hengduan Mountains / D.L.Sun, B.M.Yao, G.Yang, G.X.Sun // *Science of the Total Environment*, – 2023. – 899, – Article 165653.
15. Yang, X.Spatial differentiation of metallic micronutrients in soil–plant systems along an altitudinal gradient in the Fanjing Mountain, Southwestern plateau of China / X.Yang, G.Mu, Y.Liu [və b.] // *Environmental Monitoring and Assessment*, – 2025. – 197 (5), – Article 525.
16. Yu, Z.The transfer characteristics of potentially toxic trace elements in different soil-rice systems and their quantitative models in southeastern China / Z.Yu, J.Dong, W.Fu [və b.] // *International Journal of Environmental Research and Public Health*, – 2019. – 16 (14), – Article 2503.
17. Zhang, H. A review on the application of microelements in forests / H.Zhang, R.Chen, J.Lin [və b.] // *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, – 2022. – 46 (5), – s. 229–239.

DISTRIBUTION OF MICROELEMENTS AND THEIR ECOLOGICAL SIGNIFICANCE IN MOUNTAIN-FOREST SOILS OF THE LANKARAN ECONOMIC REGION

T.K. Ahadov

This study examines how microelements-iron (Fe), manganese (Mn), zinc (Zn), and copper (Cu) are distributed within the mountain-forest soils of the Lankaran–Astara region and their ecological significance. The research covered a range of altitudes, slope orientations, and geomorphological conditions. Soil profiles were analyzed in the field according to genetic horizons, while laboratory tests assessed morphological structure, humus layer depth, pH, texture, and microelement concentrations. Results indicate that microelement distribution is strongly influenced by topography and climatic factors. Altitudinal variation, moisture availability, and slope aspect were found to directly impact microelement bioavailability and soil fertility. These findings offer important insights for ecological evaluation, soil monitoring, and the sustainable management of soil resources.

Keywords: *microelements, mountain-forest soils, Fe, Mn, Zn, Cu, ecological significance*



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ В ГОРНО-ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ЛЕНКОРАНСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА

Т.К. Ахадов

Это исследование изучает распределение микроэлементов — железа (Fe), марганца (Mn), цинка (Zn) и меди (Cu) в горно-лесных почвах региона Лянкяран-Астара и их экологическое значение. Исследование охватывало различные высотные зоны, ориентацию склонов и геоморфологические условия. Почвенные профили анализировались в поле в соответствии с генетическими горизонтами, а лабораторные исследования оценивали морфологическую структуру, глубину гумусового слоя, уровень pH, текстуру и концентрацию микроэлементов. Результаты показывают, что распределение микроэлементов сильно зависит от топографии и климатических факторов. Изменения высоты, наличие влаги и экспозиция склонов напрямую влияют на биодоступность микроэлементов и плодородие почвы. Эти результаты предоставляют важные сведения для экологической оценки, мониторинга почв и устойчивого управления почвенными ресурсами.

Ключевые слова: *микроэлементы, горно-лесные почвы, Fe, Mn, Zn, Cu, экологическое значение.*