

UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA
ȘCOALA DOCTORALĂ ȘTIINȚE ALE NATURII

Cu titlu de manuscris:
C.Z.U. 582.32:504.3.054:551.4:551.5

CHALIGAVA OMARI

**APLICAREA MUȘCHILOR CA BIOINDICATORI PENTRU
EVALUAREA STĂRII ECOLOGICE A AERULUI
ATMOSFERIC ÎN CONDIȚII CLIMATICE ȘI DE RELIEF
DIFICILE**

166.01. ECOLOGIE

Rezumatul tezei de doctor în științe ale mediului

CHIȘINĂU 2026

Teza a fost elaborată în cadrul Școlii Doctorale Științe ale Naturii a Universității de Stat din Moldova și în cadrul Institutului de Microbiologie și Biotehnologie al Universității Tehnice a Moldovei.

Conducător științific:

Liliana CEPOI Membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat în științe biologice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei

Comisia pentru susținerea publică a tezei de doctorat:

Elena ZUBCOV	Academician al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat în științe biologice, profesor cercetător, Universitatea de Stat din Moldova – <i>președinte</i>
Liliana CEPOI	Membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat în științe biologice, conferențiar cercetător, Universitatea Tehnică a Moldovei – <i>conducător științific</i>
Laurenția UNGUREANU	Membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat în științe biologice, profesor cercetător, Universitatea de Stat din Moldova – <i>referent</i>
Anatolie PUȚUNTICĂ	Doctor în geografie, conferențiar universitar, Universitatea Pedagogică de Stat „Ion Creangă” – <i>referent</i>
Lambe BARANDOVSKI	Doctor, profesor, Institutul de Fizică, Facultatea de Științe ale Naturii și Matematică, Universitatea Cyril și Methodius, Skopje, Macedonia – <i>referent</i>

Susținerea tezei va avea loc la 09 septembrie 2026, ora 15:00 în ședința Comisiei de susținere publică a tezei de doctorat din cadrul Școlii Doctorale Științe ale Naturii, la adresa: Universitatea de Stat din Moldova (<http://www.usm.md>), str. M. Kogălniceanu 65A, clădirea 3, sala 321, MD-2009, Chișinău, Republica Moldova.

Teza de doctorat și rezumatul pot fi consultate la Biblioteca Națională a Republicii Moldova, Biblioteca Centrală a Universității de Stat din Moldova (MD-2009, Chișinău, str. Alexei Mateevici 60), pe site-ul ANACEC (<http://www.anacec.md>) și pe pagina web a USM (<http://www.usm.md>).

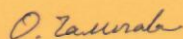
Rezumatul a fost expediat la 18.07 2026

Conducător științific



Liliana CEPOI
doctor habilitatus în științe biologice,
conferențiar cercetător, m.-c. al AȘM

Autor:



Omari CHALIGAVA

UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA
ȘCOALA DOCTORALĂ ȘTIINȚE ALE NATURII

Cu titlu de manuscris:
C.Z.U. 582.32:504.3.054:551.4:551.5

CHALIGAVA OMARI

**APLICAREA MUȘCHILOR CA BIOINDICATORI PENTRU
EVALUAREA STĂRII ECOLOGICE A AERULUI
ATMOSFERIC ÎN CONDIȚII CLIMATICE ȘI DE RELIEF
DIFICILE**

166.01. ECOLOGIE

Rezumatul tezei de doctor în științe ale mediului

CHIȘINĂU 2026

Teza a fost elaborată în cadrul Școlii Doctorale Științe ale Naturii a Universității de Stat din Moldova și în cadrul Institutului de Microbiologie și Biotehnologie al Universității Tehnice a Moldovei.

Conducător științific:

Liliana CEPOI Membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat în științe biologice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei

Comisia pentru susținerea publică a tezei de doctorat:

Elena ZUBCOV	Academician al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat în științe biologice, profesor cercetător, Universitatea de Stat din Moldova – <i>președinte</i>
Liliana CEPOI	Membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat în științe biologice, conferențiar cercetător, Universitatea Tehnică a Moldovei – <i>conducător științific</i>
Laurenția UNGUREANU	Membru corespondent al Academiei de Științe a Moldovei, doctor habilitat în științe biologice, profesor cercetător, Universitatea de Stat din Moldova – <i>referent</i>
Anatolie PUȚUNTICĂ	Doctor în geografie, conferențiar universitar, Universitatea Pedagogică de Stat „Ion Creangă” – <i>referent</i>
Lambe BARANDOVSKI	Doctor, profesor, Institutul de Fizică, Facultatea de Științe ale Naturii și Matematică, Universitatea Cyril și Methodius, Skopje, Macedonia – <i>referent</i>

Susținerea tezei va avea loc la 09 septembrie 2026, ora 15:00 în ședința Comisiei de susținere publică a tezei de doctorat din cadrul Școlii Doctorale Științe ale Naturii, la adresa: Universitatea de Stat din Moldova (<http://www.usm.md>), str. M. Kogălniceanu 65A, clădirea 3, sala 321, MD-2009, Chișinău, Republica Moldova.

Teza de doctorat și rezumatul pot fi consultate la Biblioteca Națională a Republicii Moldova, Biblioteca Centrală a Universității de Stat din Moldova (MD-2009, Chișinău, str. Alexei Mateevici 60), pe site-ul ANACEC (<http://www.anacec.md>) și pe pagina web a USM (<http://www.usm.md>).

Rezumatul a fost expedit la „_____” _____ 2026

Conducător științific

Liliana CEPOI

doctor habilitatus în științe biologice,
conferențiar cercetător, m.-c. al AȘM

Autor:

Omari CHALIGAVA

CUPRINS

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
1. BIOMONITORIZAREA CU MUȘCHI – INSTRUMENT EFICIENT PENTRU EVALUAREA POLUĂRII ATMOSFERICE	7
2. MATERIALE ȘI METODE	8
3. EVALUAREA POLUĂRII ATMOSFERICE CU METALE GRELE ÎN GEORGIA UTILIZÂND MUȘCHII CA BIOINDICATORI	8
3.1. Primul studiu de biomonitorizare națională cu mușchi (2014–2017) în Georgia ...	8
3.2. Al doilea studiul de biomonitorizare cu mușchi în Georgia: validare și extindere (2019–2023) ..	11
4. BIOMONITORIZAREA CU MUȘCHI A DEPUNERILOR ATMOSFERICE A METALELOR GRELE ÎN REPUBLICA MOLDOVA	14
5. DETERMINANȚII DE MEDIU ÎN ACUMULAREA ELEMENTELOR POTENȚIAL TOXICE	18
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI	22
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	25
ADNOTARE	30
ANNOTATION	31

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Importanța și actualitatea temei:

Calitatea aerului atmosferic reprezintă un factor determinant al stării de sănătate a populației, fiind influențată de emisiile antropogene și de factorii naturali. Conform datelor Organizației Mondiale a Sănătății, expunerea la particule în suspensie (PM– particulate matter) provoacă aproximativ 4,2 milioane de decese anual. Particulele fine sunt considerate printre cei mai periculoși poluanți atmosferici datorită capacității lor de a pătrunde în profunzime în sistemul respirator și de a acționa ca vectori eficienți pentru transportul și depunerea substanțelor toxice, inclusiv a metalelor, în organism [1, 2]. Distribuția, transportul și depunerea poluanților sunt puternic influențate de condițiile climatice și de caracteristicile topografice. Precipitațiile, temperatura, vântul și stabilitatea atmosferică afectează depunerea umedă și uscată a PM [3], în timp ce caracteristicile reliefului modifică circulația maselor de aer, dispersia poluanților și zonele de acumulare a acestora [4]. Drept urmare, regiunile cu condiții fizico-geografice contrastante pot prezenta modele substanțial diferite de depunere a poluanților chiar și în condiții comparabile de emisie.

Metalele grele și metaloizii – Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sb, V și Zn – sunt considerate extrem de periculoase chiar și în concentrații mici, datorită toxicității și potențialului lor de bioacumulare [5]. În timp ce unele dintre ele (de exemplu, Cu, Fe, Zn) sunt micronutrienți esențiali, alții (de exemplu, Cd, Hg, Pb, As) sunt toxici chiar și în concentrații foarte mici. Comportamentul metalelor în mediu depinde de forma chimică, solubilitate și starea redox, care influențează mobilitatea și biodisponibilitatea lor. Aplicațiile multiple: industriale, agricole și de altă natură, precum și eroziunea solului, defrișările și modificările în modul de utilizare a terenurilor, au dus la creșterea semnificativă a concentrației metalelor în particulele din aer. Odată emise, metalele se atașează de PM și sunt transportate la distanțe mari [5].

În regiunile montane, efectele orografice intensifică precipitațiile și depunerea umedă, în timp ce văile acționează ca zone de acumulare datorită circulației reduse a aerului și a inversiunilor de temperatură. Terenurile de câmpie pot fi mai expuse transportului la distanțe mari al poluanților și prafului resuspendat [6]. Aceste diferențe ridică întrebări importante privind comparabilitatea rezultatelor de monitorizare între regiuni cu caracteristici climatice și geomorfologice distincte.

Monitorizarea convențională necesită de obicei instrumentație costisitoare, alimentare stabilă cu energie și personal calificat, în timp ce distribuția neuniformă a stațiilor de monitorizare reduce reprezentativitatea spațială. În plus, datele reflectă expunerea pe termen scurt, mai degrabă decât cea cumulativă, subliniind necesitatea unor abordări complementare eficiente din punct de

vedere al costurilor. Atât în Republica Moldova, cât și în Georgia – țări vizate în prezentul studiu – în domeniul monitorizării calității aerului se atestă costuri operaționale înalte și un număr redus de stații. Astfel, în Moldova funcționează o rețea de 17 stații amplasate în cinci centre urbane [7], unde probele de aer sunt colectate manual, de trei ori pe zi, și analizate pentru mai mulți poluanți, inclusiv PM, SO₂, CO, NO₂, sulfați solubili, NO, fenol și formaldehidă [7]. În Georgia, măsurătorile indicative se efectuează trimestrial în 25 de orașe, iar rețeaua automată include 15 stații, la care se efectuează și măsurători ale metalelor grele. În aceste condiții monitorizarea tradițională este costisitoare și mai puțin informativă pentru evaluarea răspândirii poluanților pe teritorii extinse.

Biomonitorizarea cu ajutorul mușchilor este o abordare adecvată, cu costuri reduse, aplicabilă pe teritorii extinse, ceea ce crește credibilitatea rezultatelor. Mușchii absorb nutrienți și contaminanți direct din depunerile atmosferice, ceea ce îi face instrumente de prelevare pasivă a probelor. Din 2001, Programul European de Biomonitorizare este coordonat de Programul Cooperativ Internațional privind Efectele Poluării Aerului asupra Vegetației Naturale și Culturilor (UNECE ICP Vegetation), în cadrul Convenției privind Poluarea Atmosferică Transfrontalieră pe Lungă Distanță (CLRTAP), efectuând studii la nivel continental o dată la cinci ani [8]. Republica Moldova și Georgia au aderat la program în 2015. Ambele țări au prezentat niveluri mai ridicate a metalelor în comparație cu alte țări participante la program [8]. Republica Moldova și Georgia au în comun mai multe caracteristici relevante ale unei zone temperate, influența Mării Negre, eroziunea solului ca sursă principală a elementelor atmosferice și specii de mușchi disponibile. Totodată, aceste țări au multe diferențe semnificative: Republica Moldova este un teritoriu relativ plat, în timp ce Georgia este predominant montană. Moldova este predominant rurală, cu 74% teren agricol, față de doar 43% în Georgia [9, 10]. Aceste contraste geografice și economice oferă un potențial valoros pentru analiza comparativă.

Scopul studiului:

Elucidarea eficacității metodei de biomonitorizare cu mușchi pentru evaluarea calității aerului atmosferic în zone cu condiții fizico-geografice diferite: studiu de caz pentru Republica Moldova și Georgia.

Obiectivele principale:

- Realizarea biomonitorizării pasive cu mușchi în Republica Moldova și Georgia, regiuni caracterizate prin condiții climatice și de relief contrastante;
- Determinarea compoziției elementare a probelor de mușchi și analiza comparativă a variabilității lor spațiale și temporale;

- Identificarea și diferențierea surselor naturale (geogene) și antropogene de poluare a aerului atmosferic în regiunile studiate;
- Evaluarea influenței factorilor climatici și topografici (precipitații, altitudine, pantă) asupra acumulării elementelor în mușchi;
- Elaborarea principiilor de stabilire a nivelurilor de fond ale poluării în diferite condiții climatice și de relief;
- Elaborarea recomandărilor pentru aplicarea și interpretarea rezultatelor biomonitorizării cu mușchi în regiuni cu caracteristici fizico-geografice contrastante.

Ipoteza cercetării:

Biomonitorizarea cu mușchi captează variabilitatea spațio-temporală a depunerilor atmosferice prin efectele integrate ale climei și reliefului asupra acumulării de oligoelemente iar, atunci când este cuplată cu metode statistice multivariate avansate și date de mediu suplimentare, permite o discriminare robustă între sursele geogene și cele antropogene pe diverse gradient climatice și geomorfologice.

Sinteza metodologiei cercetării și justificarea metodelor de investigație:

Evaluarea la scară națională a poluării atmosferice cu metale grele și metaloizi a fost efectuată utilizând metoda de biomonitorizare cu mușchi. Această metodă a permis o evaluare spațială cuprinzătoare a poluării. Inițial în Georgia au fost colectate mai multe specii de mușchi pentru a asigura acoperirea maximă a teritoriului, în timp ce în Republica Moldova s-a utilizat o singură specie. Analiza elementară a mușchilor a fost efectuată utilizând metode analitice complementare: Analiza Instrumentală prin Activare cu Neutroni (INAA), Spectrometria de Absorbție Atomică (AAS) și Spectrometria de Emisie Optică cu Plasmă Cuplată Inductiv (ICP–OES). În vederea evidențierii efectelor variabilelor de mediu asupra acumulării metalelor în mușchi, designul studiului s-a bazat pe compararea a două țări cu caracteristici climatice și geologice distincte. Pentru această comparație controlată a fost selectată o singură specie de mușchi (pentru ambele țări) pentru a elimina variabilitatea interspecifică. De asemenea, pentru a izola influența factorilor naturali de mediu și a minimiza distorsiunile introduse de probele asociate cu activități antropogene directe sau surse locale de poluare, a fost aplicat testul Grubbs pentru a identifica și exclude valorile statistice aberante. A fost efectuată o analiză statistică multivariată cuprinzătoare pentru a extrage grupuri semnificative din datele compoziționale. Analiza Componentelor Principale (PCA) a servit la reducerea dimensionalității și la identificarea factorilor latenți ce reprezintă sursele comune de poluare. Asocierile dintre concentrațiile elementare și variabilele-cheie de mediu au fost evaluate în baza coeficientului de corelație de rang

Spearman. În final, testul neparametric Kruskal-Wallis a fost aplicat pentru a detecta diferențe statistice semnificative de acumulare a metalelor între diferite grupuri geografice sau ecologice.

Noutatea și originalitatea științifică: Noutatea lucrării constă în evaluarea integrată a eficienței biomonitorizării cu mușchi în condiții climatice și de relief contrastante, utilizând o abordare comparativă între Republica Moldova și Georgia. Studiul demonstrează, pentru prima dată, rolul decisiv al factorilor topoclimatici (precipitații, altitudine, teren) în controlul modelelor de depunere atmosferică și acumularea elementelor în mușchi, dincolo de influența surselor de emisie.

Importanța teoretică a lucrării constă în extinderea cadrului conceptual al biomonitorizării prin includerea factorilor climatici și de relief ca factori cheie ai transportului și acumulării poluanților. Cercetarea contribuie la o înțelegere mai profundă a mecanismelor depunerilor atmosferice, inclusiv a proceselor de depunere uscată și umedă, și a interacțiunii lor cu factorii de mediu în modelarea proceselor geochimice în biomonitori.

Valoarea aplicativă a lucrării constă în elaborarea recomandărilor metodologice pentru interpretarea datelor de biomonitorizare cu mușchi în regiuni cu condiții climatice și geomorfologice diferite. Rezultatele susțin stabilirea unor niveluri de fond specifice regiunii, îmbunătățirea strategiilor de monitorizare a mediului și identificarea mai precisă a surselor de poluare, furnizând baza pentru managementul de mediu și elaborarea politicilor în acest domeniu.

1. BIOMONITORIZAREA CU MUȘCHI – INSTRUMENT EFICIENT PENTRU EVALUAREA POLUĂRII ATMOSFERICE

Primul capitol al tezei prezintă fundamentele științifice ale evaluării poluării atmosferice, începând cu caracterizarea poluanților atmosferici ca un amestec complex. Este prezentat modul în care poluarea atmosferică cu particule în suspensie (PM) favorizează transportul elementelor potențial toxice (EPT), ale căror efecte asupra sănătății sunt determinate de dimensiunea particulelor, de la PM₁₀ până la particulele ultrafine, precum și de forma chimică a metalelor. Se discută modul în care meteorologia, topografia și sursele de emisie controlează distribuția spațială a contaminanților, evidențiindu-se limitele rețelelor tradiționale de monitorizare. Capitolul stabilește principiile biomonitorizării cu mușchi ca alternativă eficientă din punct de vedere al costurilor, subliniind caracteristicile biologice unice ale mușchilor, și anume lipsa rădăcinilor, cuticula slab dezvoltată și absorbția directă a depunerilor umede și uscate, care îi fac instrument eficient pentru estimarea depunerilor poluanților la scară locală, regională și continentală, în cadrul programelor internaționale precum ICP Vegetation.

2. MATERIALE ȘI METODE

Cadrul metodologic elaborat în acest studiu oferă o bază cuprinzătoare și robustă pentru evaluarea poluării atmosferice prin biomonitorizare cu mușchi. Combinarea protocoalelor standardizate de colectare a probelor, a metodelor complementare de analiză elementară și a controlului riguros al calității asigură fiabilitatea și acuratețea datelor obținute.

Modelul comparativ, care implică două țări cu condiții climatice și geomorfologice diferite, permite determinarea factorilor de mediu care influențează acumularea poluanților. Integrarea instrumentelor statistice – analiză corelațională, teste neparametrice, PCA și Factorizarea Matricei Pozitive (PMF) – permite identificarea grupurilor de elemente, relațiile între ele și sursele potențiale de poluare. Includerea analizei spațiale prin Sistemul Informațional Geografic (GIS), împreună cu parametrii de mediu precum clasificarea climatică, altitudinea, panta, precipitațiile și densitatea populației, îmbunătățește interpretabilitatea rezultatelor și susține evaluarea factorilor de mediu care influențează distribuția poluanților. Metodologia aplicată este potrivită pentru evaluarea calității mediului la scară largă și oferă o bază solidă pentru analiza și discutarea rezultatelor prezentate în capitolele următoare.

3. EVALUAREA POLUĂRII ATMOSFERICE CU METALE GRELE ÎN GEORGIA UTILIZÂND MUȘCHII CA BIOINDICATORI

Acest capitol prezintă rezultatele primului program de biomonitorizare cu mușchi din Georgia, conceput pentru a evalua depunerea EPT atât din surse geogene, cât și antropogene. Au fost efectuate două studii la nivel național (2014–2017 și 2019–2023), utilizând tehnici analitice precum INAA, AAS și ICP–OES pentru determinarea compoziției elementare a probelor de mușchi. A fost evaluată influența unor factori, inclusiv specia, locul de prelevare și clima regională, în timp ce instrumentele analitice și statistice – corelația Spearman, PCA, PMF și indicii de risc ecologic - au fost folosite pentru a descrie natura, sursa și riscurile potențiale ale poluării. Comparațiile temporale au fost efectuate utilizând testul Mann–Whitney U și prin examinarea variațiilor factorului de contaminare între perioadele de colectare a probelor.

3.1. Primul studiu de biomonitorizare națională cu mușchi (2014–2017) în Georgia

Pentru prima dată în Georgia, a fost obținut un set comprehensiv de date de referință pentru 41 de elemente, prin analiza a 120 de probe de mușchi (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp., *Hypnum cupressiforme* Hedw. și *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.), care au fost colectate pe teritoriul întregii țări între 2014 și 2017 [11]. Pentru analiza elementară a speciilor de mușchi colectate au fost utilizate două tehnici analitice complementare: INAA și AAS.

Conținutul mediu de Al în probe a fost la nivel de 5137 ± 3707 mg/kg, cu valori cuprinse între 759 mg/kg (locația nr. 23, regiunea Abastumani, Pasul Zekari) și 24500 mg/kg (locația nr. 114, Imereti, Chiatura). Concentrațiile maxime de Zr (media $13,1 \pm 10,7$ mg/kg), împreună cu As, Th și U, au fost identificate în proximitatea minei de cărbune Tkibuli (nr. 83), reflectând acumularea elementelor asociată activității miniere. Regiunea minieră Chiatura din vestul Georgiei este situată în unul dintre cele mai mari bazine de zăcămintă sedimentare de minereu de mangan din lume [12]. În studiul de față, concentrațiile maxime de Mn (2530, 2470 și 2010 mg/kg) au fost determinate în 2017 în locațiile nr. 113, 114 și 112. O singură valoare aberantă de As de 83,30 mg/kg în punctul de colectare a mușchilor nr. 87 este atribuită complexului minier de arsenic din satul Uravi, unde concentrațiile de As în sol ajung până la 164.000 mg/kg [13]. Concentrația medie generală de As a fost de $2,02 \pm 7,56$ mg/kg (interval: 0,18–83,30 mg/kg). Titanul a avut o medie de 458 ± 377 mg/kg, cu concentrații maxime în apropierea orașului Tkibuli (nr. 82), ca urmare a impactului extragerii cărbunelui. Fe a avut o medie de 3631 ± 2599 mg/kg, cu un maxim de 14100 mg/kg în regiunea Borjomi (nr. 8), atribuit surselor crustale.

CV% a fost cuprins între 30 și 85% pentru majoritatea elementelor, înregistrând valori semnificativ mai mari pentru Cu (186%), As (238%), Mn (162%), Ti (105%) și V (104%), indicând distribuții anormale determinate de factori externi. Corelațiile pozitive puternice ($r > 0,95$) între grupurile Ti–V, Cr–Co–Fe–Ni și pământuri rare sugerează originea geochimică comună, U și Th au arătat o corelație $r > 0,6$ (Figura 3.1).

Analiza comparativă nu a evidențiat diferențe semnificative statistic între valorile medii ale elementelor determinate la speciile investigate, cu excepția perechii *Hylocomium splendens* – *Hypnum cupressiforme* ($p = 0,04$). Valorile mediane prezentate în acest studiu s-au dovedit a fi în bună concordanță cu cele publicate pentru Macedonia [14], Bulgaria [15], și Norvegia [16]. În Georgia au fost determinate cele mai mari concentrații mediane de Na (581 ± 235 mg/kg), Mg (3060 ± 770 mg/kg) și Al (4295 ± 1500 mg/kg) comparativ cu Macedonia, Bulgaria și Norvegia. În Georgia au fost detectate și cele mai mari valori de V ($9,4 \pm 4,12$ mg/kg), Cr ($7,75 \pm 2,65$ mg/kg), Fe (2725 ± 1050 mg/kg), Co ($1,43 \pm 0,61$ mg/kg) și Ni ($5,56 \pm 1,8$ mg/kg), medianele fiind de aproximativ 2–10 ori mai mari decât cele ale celor trei țări. Cu toate acestea, cele mai mari concentrații ale Mn, au fost determinate în Norvegia (400 mg/kg), urmată de Bulgaria (180 mg/kg), Macedonia de Nord (160 mg/kg) și Georgia ($141 \pm 54,7$ mg/kg). După valorile de Pb, Bulgaria ocupă o poziție principală cu 10,7 mg/kg, urmată de Georgia ($5,57 \pm 2,33$ mg/kg) și Macedonia de Nord (4,9 mg/kg), în timp ce mediana Norvegiei este excepțional de scăzută, – 0,05 mg/kg.

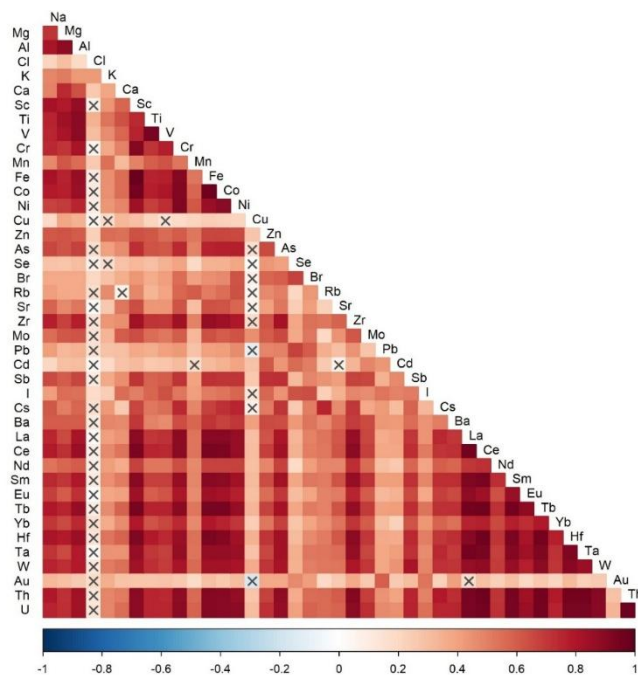


Figura 3.1. Matricea de corelație Spearman a variabilelor măsurate în primul studiu de monitorizare în Georgia.

Evaluarea Indicelui de Risc Ecologic Potențial (PER) a arătat că Zn, Cr, Pb, Ni și Cu prezintă un risc ecologic neglijabil, în timp ce pentru As și Cd a fost identificat un risc considerabil, asociat activităților miniere de la Uravi, Kazreti și Chiatura. Valorile maxime a Indicelui de Încărcare a Poluanților (PLI) au fost înregistrate (Figura 3.2) în patru locații de prelevare a probelor: nr. 38 în vecinătatea depozitelor de deșeuri contaminate cu arsenic; nr. 53 în apropierea localității Telavi, influențată de unitățile de producție a materialelor de construcții; nr. 64, în apropierea fabricilor de asfalt și construcții; și nr. 12, atribuită geologiei vulcanice locale din Pleistocen. Grupuri secundare de risc ridicat au fost identificate în apropierea unităților industriale din Kutaisi și Zestafoni, a minelor de cărbune din Tkibuli și a complexului minier Chiatura.

PCA a explicat 51,86% din varianța cumulativă în cele trei componente. Analiza a relevat trei cluster. Clusterul 1 (Na, Al, Sc, Ti, V, Fe, Co) a fost definit ca elemente geogene cu asociere antropogenă. Clusterul 2, a inclus surse geogene și antropogene de elemente de proveniență geologică (Th:U, Hf:Zr, pământuri rare) și As, a cărui sursă sunt minele de arsenic. Clusterul 3 (Mg, Cl, K, Ca, Mn, Ni, Zn, Br, Rb, Sr, I, Ba) a fost compus în principal din elemente crustale. În cadrul acestui cluster, Br și I au fost atribuite transportului de aerosoli marini, iar concentrațiile ridicate de Mn au fost asociate cu exploatarea regională a manganului.

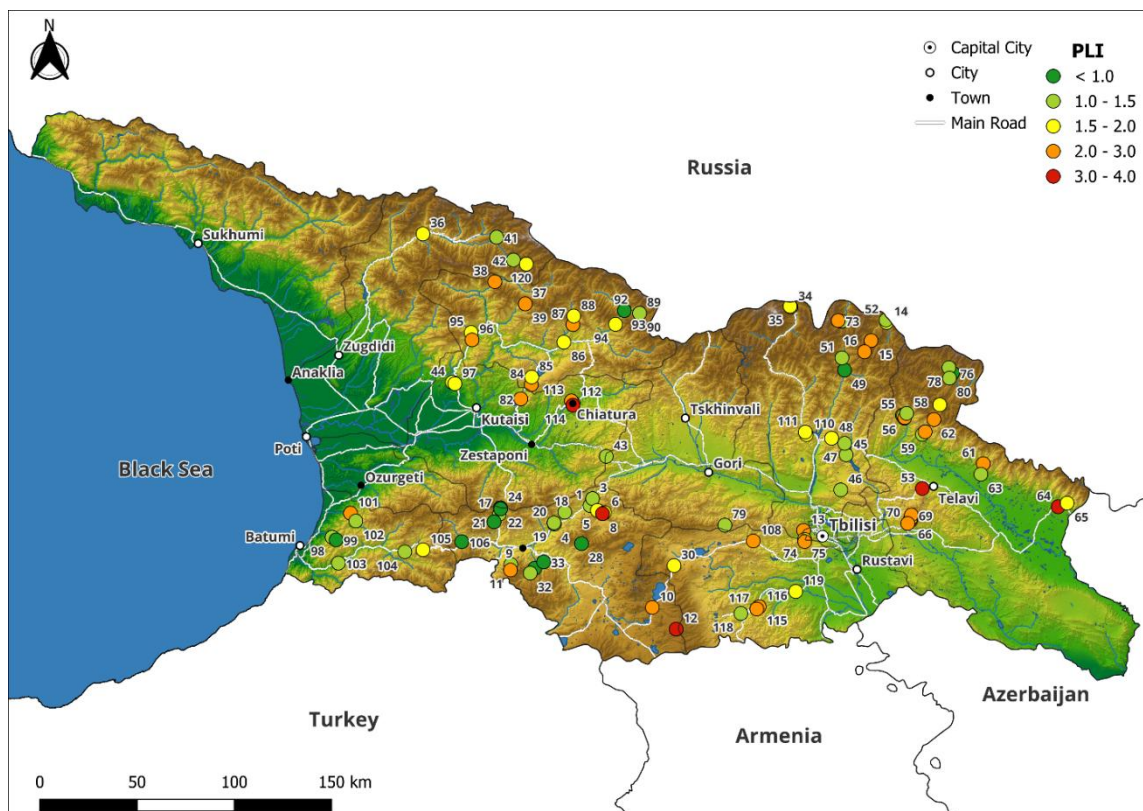


Figura 3.2. Distribuția spațială a indicelui de încărcare cu poluanți (PLI) în primul studiu de biomonitorizare cu mușchi, Georgia.

În concluzie, alterarea și transportul elementelor din surse marine și montane sunt influențate semnificativ de direcțiile predominante ale vântului, de efectele orografice ale Munților Caucazul Mare și Mic și de zonele climatice distincte ale Georgiei de Est și de Vest, afectând acumularea atmosferică a EPT de către mușchi, în timp ce asocierile cu roca crustală și solul relevă o contribuție geogenă semnificativă.

3.2. Al doilea studiul de biomonitorizare cu mușchi în Georgia: validare și extindere (2019–2023)

În cadrul celui de-al doilea studiu de biomonitorizare cu mușchi (2019–2023), probele au fost colectate din 95 de locații distincte. Specia dominantă a fost *Hypnum cupressiforme*; 15 elemente au fost determinate folosind ICP–OES, iar Hg – folosind DMA-80. Setul de date prezintă o distribuție non-normală și asimetrică pozitivă, cu cea mai mare variabilitate pentru Pb (CV% = 94%) și Mn (CV% = 74%). Elementele precum S (26%), Zn (30%) și Sr (31%) au arătat cele mai mici valorile ale coeficientului de variație, indicând surse difuze sau uniforme.

Comparativ cu Armenia [17], în Georgia concentrațiile mediane ale elementelor în general au fost mai mici. În Armenia au fost înregistrate valori semnificative pentru Ba, Co, Cr, Cu, Fe și V, Cr și Fe, acestea fiind de 4-6 ori mai mari decât medianele din Georgia. Acest lucru se datorează unei acoperiri forestiere mai reduse în Armenia (11,1% față de 40,6% în Georgia), ce intensifică

eroziunea eoliană și încărcătura de praf, și unei diferențe metodologice – în studiile din Armenia au fost utilizate preponderent specii de mușchi acrocarpe, în loc de speciile pleurocarpe recomandate. Comparativ cu Kazahstanul [18] (unde a fost colectat *Hylocomium splendens*), concentrațiile mediane sunt substanțial mai mari pentru majoritatea elementelor. De exemplu, cantitatea Al a fost de cinci ori mai mare (10550 față de 2131 mg/kg), reflectând activitatea industrială intensă și contribuția prafului de sol.

Comparația cu studiul din Georgia din 2015, cel de-al doilea studiu indică o scădere generală a concentrațiilor mediane ale metalelor. Scăderile esențiale includ Al (4295→2131 mg/kg), Cr (7,75→3,71 mg/kg) și Fe (2725→1826 mg/kg); valorile pentru Cd și Zn au rămas relativ stabile, în timp ce concentrația de Cu a crescut de la 5,54 la 7,06 mg/kg. Evaluarea statistică prin testul Mann-Whitney U a relevat diferențe semnificative ($p < 0,05$) între cele două studii pentru toate elementele, cu excepția Cd, Pb și Zn.

Corelațiile puternice între Cr, Co, V, Al și Fe ($r = 0,74-0,91$) indică o origine geogenă comună a acestor elemente, în timp ce grupul Cu–Zn–Pb–Cd provin din emisiile vehiculelor ca o sursă antropogenă semnificativă. PCA (Figura 3.3) a relevat că PC1 (43,4% din varianță) reprezintă o amprentă geogenă (Al, Co, Cr, Fe, V), cu cele mai mari încărcături în apropierea terenurilor agricole, reflectând drept sursă praful de sol provenit din practicile agricole. PC2 (13,3%) – Cd, Hg, Mn, Pb și Zn – reflectă poluarea antropogenă care poate fi datorată emisiilor de pe autostrăzi, zone urbane și uzina de feroaliaje din Zestafoni (Figura 3.3).

PMF a confirmat rezultatele PCA și a identificat trei factori sursă: (1) praful de sol (crustă – încărcături ridicate de Al, V, Cr, Fe, Co); (2) surse antropogene – minerit și industrie (conținut ridicat de Hg, S, Cu, Zn); și (3) un mix geogen-antropogen dominat de Mn, Ba și Cd.

Majoritatea valorilor medii ale Factorului de Contaminare (CF) au scăzut între studii, indicând reducerea contaminării. Cuprul constituie o excepție notabilă: mediana a crescut de la 1,04 la 1,29, trecând din categoria „Fără Contaminare” la categoria „Suspect”. Cele mai pronunțate scăderi ale CF au fost înregistrate pentru Cd (1,86→0,98) și Ni (1,69→1,17), ambele apropiindu-se de categoria „Fără Contaminare”. Ba, Co, Mn și V au arătat, de asemenea, reduceri semnificative. Valorile medii a PLI au scăzut de la 1,74 la 1,41, iar cea mediană de la 1,50 la 1,34, ambele încadrându-se în categoria „Poluare minimă spre moderată”. Poluarea cu Mn a rămas acută în apropierea localității Zestafoni, unde Uzina de Feroaliaje prelucrează minereul din Chiatura. Concentrațiile de Mn în mușchii colectați în apropierea minelor din Chiatura au fost de aproximativ 2,4 ori mai scăzute decât în cei din apropierea uzinei din Zestafoni.

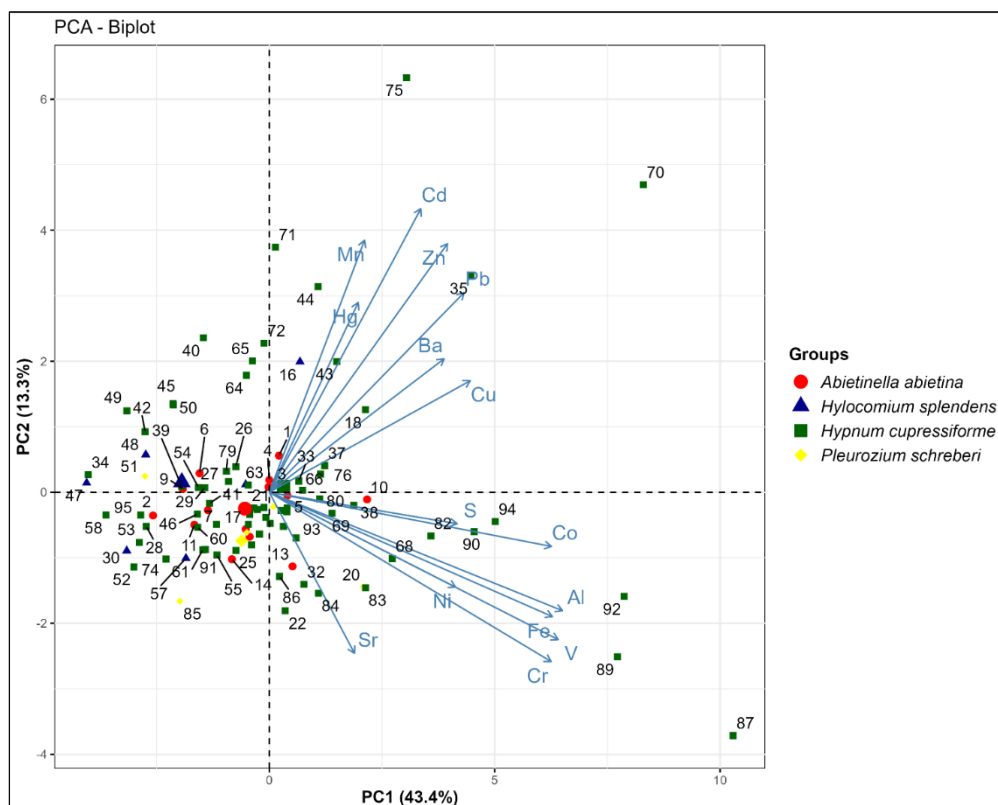


Figura 3.3. Biplotul componentelor principale PC1 și PC2 reprezintă primele două componente principale, care explică 56,7% din variația totală a datelor. Fiecare punct, diferențiat printr-o combinație unică de culoare și simbol, reprezintă un eșantion aparținând uneia dintre cele patru specii. Săgețile care pornesc din origine reprezintă variabilele analizate.

Valorile ridicate ale CF pentru Pb în apropierea orașelor Kutaisi și Lopota sunt atribuite emisiilor din transporturi, industriei și construcției centralei hidroelectrice din apropierea orașului Lopota, îmbogățirea sedimentelor în amonte fiind un factor care contribuie la acestea. Cele mai ridicate valori ale PLI au fost înregistrate la locațiile nr. 87 (Heretiskari, PLI = 3,21) și nr. 70 (Kutaisi, PLI = 3,06). Locația din Kutaisi se află la 3 km de o zonă industrială cu niveluri ridicate de PM, în timp ce PLI ridicat în apropierea Heretiskari este atribuit prafului de sol transportat de vânt și sedimentelor fluviale dintr-un vechi curs de apă.

Conform PER (Figura 3.4), riscuri semnificative au fost asociate cu Cd și Hg în mai multe locații, cu un risc mediu pentru Pb în două locații. Astfel, un PER semnificativ (112) pentru Cd a fost identificat în locația de coastă nr. 65 din Anaklia, care poate fi atribuit prafului provenit din deșeurile de construcție ale portului. Kutaisi și Zestafoni au avut scoruri PER semnificative pentru Cd de 99 și, respectiv, 89. Locația nr. 40, unde a fost determinată cea mai mare concentrație de Hg (0,113 mg/kg), se află la circa 5 km de cariera de nisip de cuarț Savane. Un PER ridicat de 125 pentru Hg a fost asociat cu proba nr. 35 din Pasul Rikoti, unde emisiile antropogene de Hg provin din gazele de eșapament ale vehiculelor, abraziunea frânelor și anvelopelor și perturbările geologice cauzate de foraje și explozii în timpul lucrărilor majore de construcție a drumurilor.

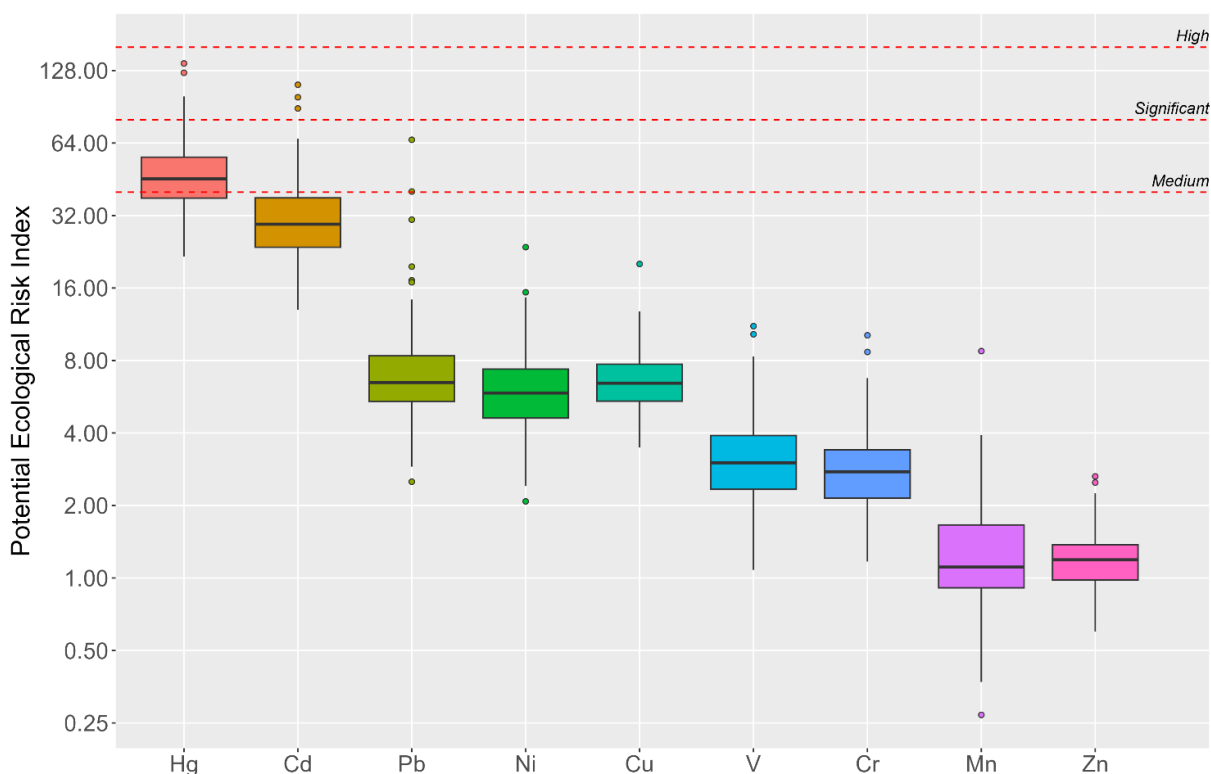


Figura 3.4. Diagrame boxplot ale indicelui de risc ecologic potențial (RI) pentru elementele selectate acumulate în mușchi.

Valorile Indicelui de Risc Ecologic potențial (RI) indică un risc ecologic scăzut pentru majoritatea locațiilor de prelevare a probelor de mușchi, și risc moderat limitat în 16 probe (valori 150,5–254,7), cele mai ridicate valori înregistrându-se la Kutaisi (nr. 70) și Pasul Rikoti (nr. 35).

4. BIOMONITORIZAREA CU MUȘCHI A DEPURERILOR ATMOSFERICE A METALELOR GRELE ÎN REPUBLICA MOLDOVA

Acest capitol prezintă rezultatele celui de al doilea studiu național de biomonitorizare cu mușchi în Moldova, conceput pentru a evalua distribuția spațială și sursele de depunere atmosferică a metalelor grele. Probe de mușchi *Hypnum cupressiforme* au fost colectate din 41 de locații la nivel național în 2020 și supuse analizei multielementare prin NAA și AAS. Pentru interpretarea datelor au fost calculate statistici descriptive, și au fost aplicate instrumente de evaluare a poluării, cum ar fi CF, PLI și PER. Identificarea surselor de poluare a fost efectuată utilizând analiză factorială cu rotație Varimax, PCA și corelație Spearman, în timp ce dinamica temporală a fost investigată prin compararea datelor prezentului studiu cu datele din 2015/2016 [19], cu diferențele semnificative testate prin statistici neparametrice.

Nivelurile de potasiu au rămas aproape același, mediana din 2020 (7250 ± 1000 mg/kg) aliniindu-se îndeaproape cu valoarea din 2015 (7100 ± 1500 mg/kg). Creșteri minore au fost

observate pentru Al (3400 ± 1200 mg/kg, față de 3120 ± 1100 mg/kg) și Fe (2200 ± 600 mg/kg, față de 2100 ± 900 mg/kg). Pentru Ca a fost înregistrată o ușoară scădere la 9300 ± 1500 mg/kg față de 9900 ± 1100 mg/kg. Cele mai semnificative reduceri au fost observate pentru Pb și Cd. Mediana din 2020 pentru Cd ($0,12 \pm 0,04$ mg/kg) este semnificativ mai mică decât valoarea din 2015 ($0,39 \pm 0,08$ mg/kg), în timp ce Pb a scăzut la $3,1 \pm 0,4$ mg/kg față de $12 \pm 2,5$ mg/kg. Cuprul a prezentat, de asemenea, o tendință descendentă pronunțată, scăzând la $8,7 \pm 1,0$ mg/kg față de $15 \pm 3,0$ mg/kg. Cromul și arsenicul au arătat scăderi mai moderate, în timp ce concentrațiile de Zn au rămas relativ stabile (2020: 39 ± 7 mg/kg față de 2015: $37,2 \pm 8,5$ mg/kg). EPT, cum ar fi La, Ce și Sm, au arătat mediane constante în cele două perioade de studiu.

Analiza spațială a evidențiat o variabilitate spațială pronunțată a conținutului de Al, cu cele mai mari concentrații detectate în apropiere de Bălți (11700 mg/kg), Comrat (10600 mg/kg), Briceni (9520 mg/kg) și Chișinău (9180 mg/kg) [20]. O regularitate comparabilă a fost observată pentru Fe, cu valori ridicate înregistrate în special în apropiere de Edineț (7810 mg/kg), Bălți (6930 mg/kg) și Chișinău (6150 mg/kg) [20], atribuibile prafului rutier resuspendat, aporturilor litogenice, arderii cărbunelui și emisiilor autovehiculelor. Cele mai mari concentrații de Zn au fost înregistrate în apropiere de Cahul (86 mg/kg), urmat de Rezina, Vadul-lui-Vodă și Chișinău, fiind asociate în principal cu emisiile transportului. Conținutul ridicat de Cu, îndeosebi în regiunile nordice și centrale, poate fi atribuit utilizării pesticidelor. Distribuția spațială a Pb a indicat o poluare mai ridicată în regiunea centrală, în special în Chișinău, Rezina, Bălți și Drochia [20]. Cel mai mare conținut de Cd a fost detectat în proximitatea localităților Cahul ($0,56$ mg/kg) și Rezina ($0,42$ mg/kg). Datele biomonitorizării cu mușchi evidențiază în mod specific regiunea Bălți, unde concentrațiile tuturor elementelor analizate au atins niveluri naționale maxime, care pot fi atribuite unei densități mari de surse industriale, inclusiv Centrala Termoelectrică „Nord”, producători de utilaje și activitățile semnificative în domeniul materialelor de construcții, textilelor, prelucrării pielii și depozitării petrolului [20].

Comparațiile între cele două studii prin testul Mann–Whitney U nu au evidențiat diferențe semnificative ($p > 0,05$) pentru majoritatea elementelor. Diferențe semnificative ($p < 0,05$) au fost observate pentru Cr, As, Se, Br, Sb, Cd, Pb și Cu, toate prezentând valori mediane mai mici în 2020, care potențial pot fi atribuite modificărilor indisponibilității determinate de variațiile ratelor de depunere umedă și uscată.

Din analiza factorială au fost extrași patru factori, care includ 84% din variabilitate (Figura 4.1). Factorul 1 (47% din varianță) reprezintă o sursă terigenă, susținut de încărcările ridicate ale elementelor crustale (Al, Sc, Ti, Th) și incluzând suplimentar Na, Cr, Fe, Co, Ni, As, Rb, Sb, Cs și U. Mg, Ca și Sr sunt asociate Factorului 2 (14% din varianță), și pot fi atribuite extracției de

minerale din aproximativ 900 de cariere din Moldova ca probabilă sursă. Factorul 3 (12% din varianță) este asociat activităților agricole (Cl, K, Br, Cu), Br și Cl fiind componente comune ale fungicidelor și îngrășămintelor cu potasiu [21]. Factorul 4 (11% din varianță) prezintă o amprentă antropogenă a arderii combustibililor fosili, marcată de Zn, Sb, Cd și Pb, cu concentrațiile cele mai ridicate în nordul și nord-estul țării.

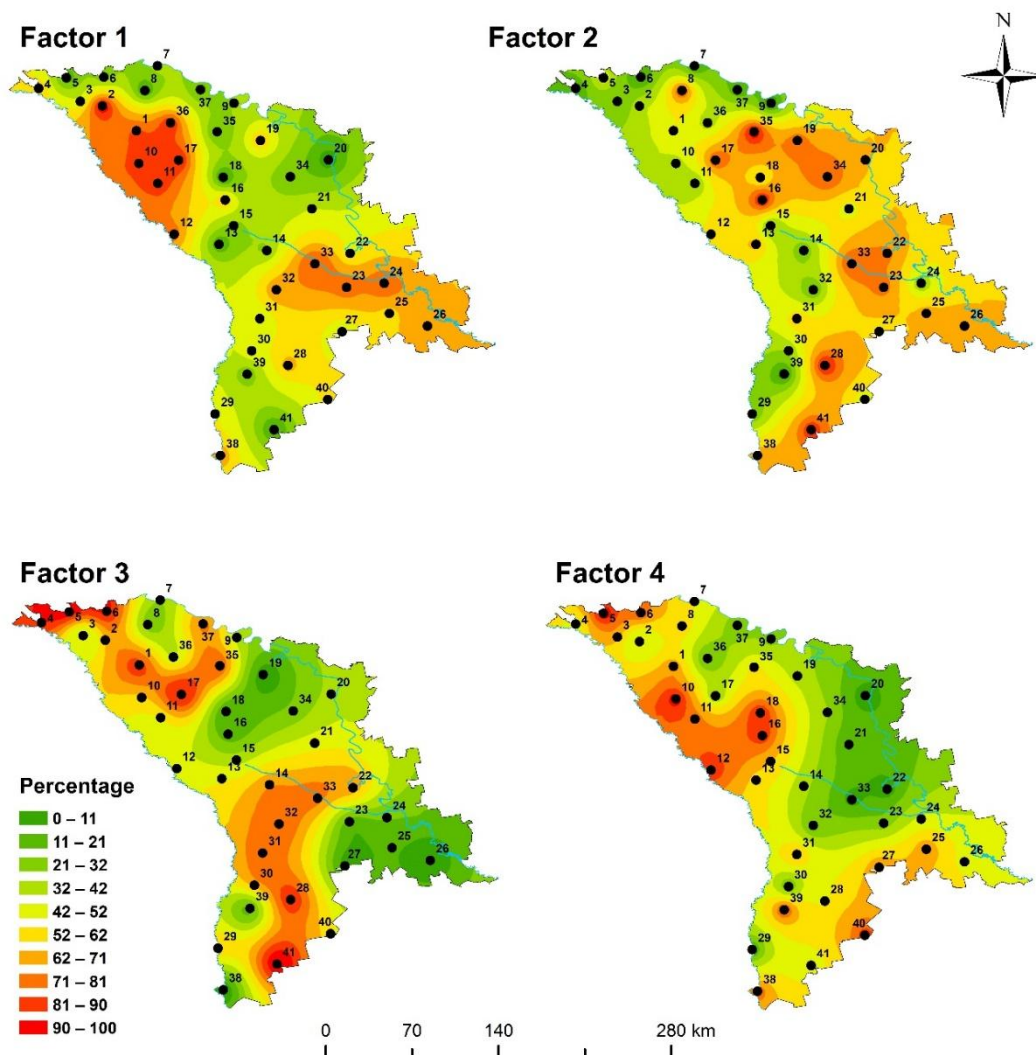


Figura 4.1. Harta distribuțiilor spațiale ale factorilor 1-4.

Aplicarea testului Wilcoxon pentru locații de prelevare identice a evidențiat variații semnificative ($p < 0,05$) pentru Cr, As, Sb, Cd, Pb și Cu. A fost evidențiată o tendință generală descendentă, cu cele mai substanțiale reduceri pentru Pb (scădere de 75%) și Cd (scădere de 66%) (Figura 4.2). Scăderi moderate au fost înregistrate pentru Cu (43%) și V și Cr (câte 31%), în timp ce Zn a arătat o ușoară creștere de 8,9%.

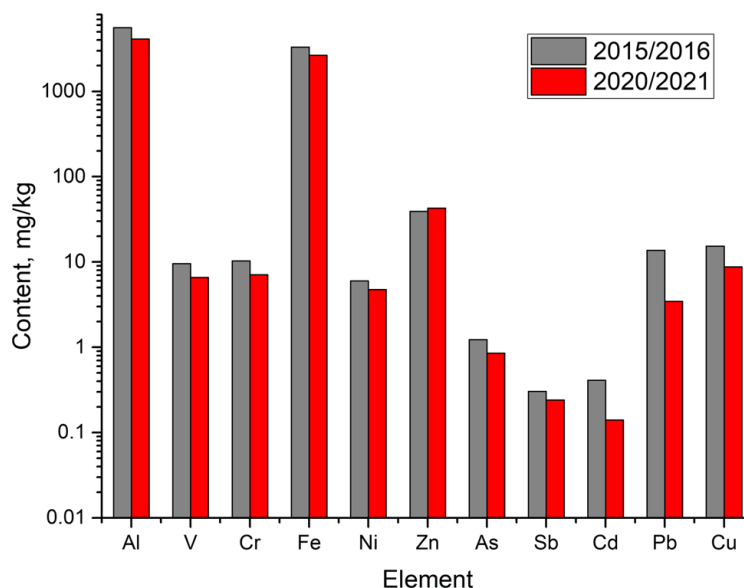


Figura 4.2. Compararea rezultatelor a două studii de biomonitorizare cu mușchi în Moldova.

PCA a identificat gradienti și clustere-cheie în studiul anterior și actual, care a vizat biomonitorizarea cu mușchi în Moldova. Corelațiile puternice constante pentru grupuri specifice de elemente din ambele studii indică surse comune persistente de emisii. În 2015, au fost identificate clustere distincte de corelație: unul pentru Cu și Sb și altul pentru Ni, Cr, Fe, Al, V și As. Studiul din 2020-2021 a identificat Chișinăul ca sursă probabilă pentru Cu, Ni și Sb, cu corelații suplimentare V–Al în proximitatea orașului Comrat și As–Fe–Cr în vecinătatea orașelor Edineț și Bălți. Aceste surse sunt atribuite particulelor de sol resuspendate, producerii de energie termică, transportului rutier și activității industriale [20].

Conținutul mediu de Al în mușchii din Moldova (3400 mg/kg) este semnificativ mai mare decât în oricare dintre țările vecine. Elemente precum As, Ni, V și Cr se găsesc, de asemenea, în cele mai mari concentrații în Moldova. În schimb, Moldova a arătat cea mai mică concentrație mediană de Cd dintre toate țările care au participat în studiu (0,1 mg/kg), considerabil mai mică decât Ucraina (0,31 mg/kg) și Polonia (0,21 mg/kg). În mod similar, concentrația mediană de Pb în Moldova (3,1 mg/kg) este printre cele mai mici din regiune. Frațiunile de masă mari de Al, Fe, Ni, V și As în mușchii din Moldova provin nu numai din surse antropogene, ci și din particulele de sol, favorizate de vremea relativ uscată, precipitații reduse și suprafețe extinse de teren arabil.

Rezultatele analizei corelaționale (Figura 4.3) sunt în concordanță deplină cu analiza factorială. În grupul celor 19 elemente, corelațiile pozitive puternice între Al, Si, Ti și elementele rare sugerează o sursă comună a mineralelor aluminosilicatice.

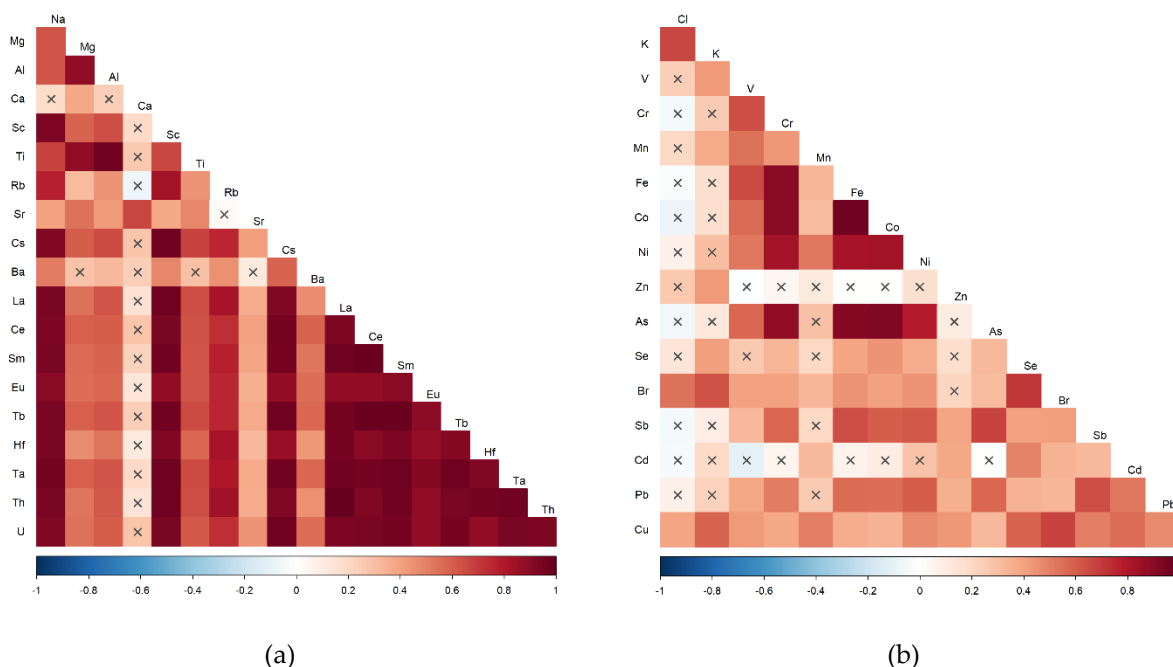


Figura 4.3. Matricea de corelație Spearman a conținutului de elemente în mușchii din Moldova: (a) 19 elemente de origine naturală, (b) 16 elemente de origine mixtă naturală și antropică.

Ansamblul Cd–Zn–Pb–Sb–Cu este asociat surselor antropogene, aceste elemente fiind în mod obișnuit emise în procesul de prelucrare a metalelor neferoase, traficului rutier și transportului pe distanțe lungi a poluanților, în timp ce Sb servește drept traser pentru uzura plăcuțelor de frână, iar Cu pentru emisiile legate de vehicule [22, 23].

5. DETERMINANȚII DE MEDIU ÎN ACUMULAREA ELEMENTELOR POTENȚIAL TOXICE

Acest capitol prezintă o analiză comparativă transnațională care combină datele studiilor de biomonitorizare cu mușchi în Georgia și Moldova [20, 24] pentru a examina modul în care parametrii de mediu influențează depunerea EPT. Investigația a fost controlată pentru variabilitatea biologică prin selectarea exclusivă a probelor de *Hypnum cupressiforme*, iar valorile aberante statistice asociate surselor locale de poluare au fost eliminate pentru a focaliza analiza pe semnalele regionale. Studiul a evaluat modul în care factori ca altitudinea, precipitațiile medii anuale și panta topografică, precum și unele variabile categoricale -clasificarea climatică Köppen-Geiger, zonele de altitudine, tipul de teren și densitatea populației - influențează acumularea EPT de către mușchi. În acest scop au fost utilizate multiple tehnici statistice, inclusiv analiza de corelație, teste de semnificație neparametrice și PCA.

Testul Grubbs pentru valori aberante ($\alpha = 0,05$) a fost aplicat pentru a exclude locațiile cu concentrații anormal de mari, ce pot fi atribuite surselor punctuale, reducând setul de date de la 70 la 55 de probe în Georgia și de la 41 la 30 de probe în Moldova.

Matricea de corelație (Figura 5.1) pentru setul de date ajustat a arătat intercorelații pozitive puternice ($r = 0,54-0,86$) pentru Al, Co, Cr, Fe, Ni și V, sugerând originea naturală comună a lor asociată cu materialele crustale sau praful de sol [20]. În schimb, variabilele topografice și climatice - precipitațiile medii, panta și altitudinea - au prezentat corelații negative ($r = -0,42$ la $-0,61$) cu Zn, Ba, Cr, Al, Cu, Fe și Sr.

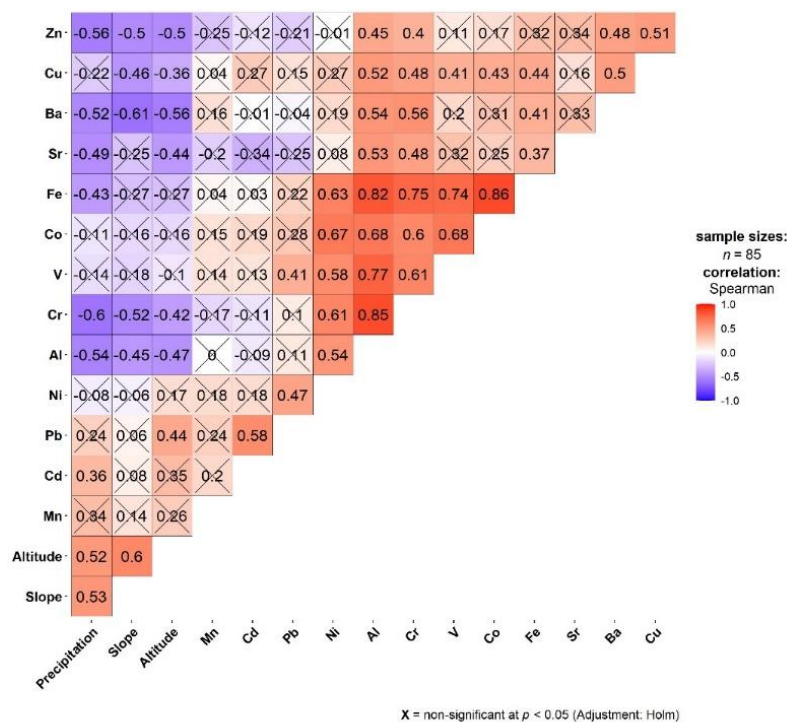
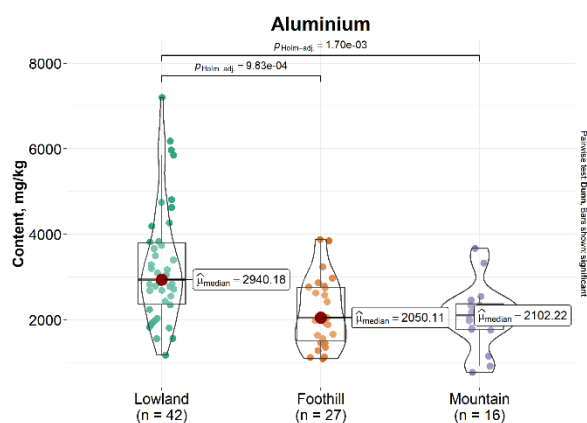


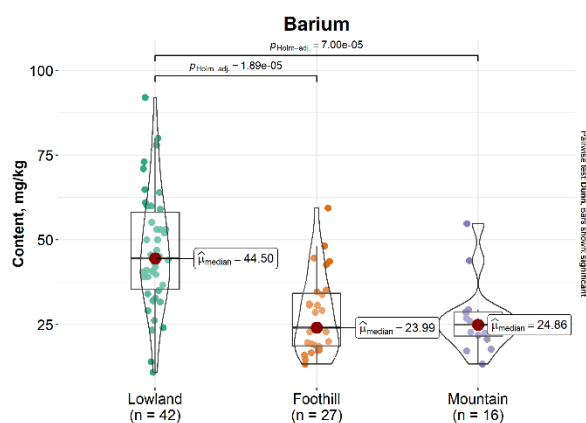
Figura 5.1. Matricea de corelație Spearman între elementele întregului set de date ajustat.

Testul Kruskal–Wallis a indicat diferențe semnificative în concentrațiile elementelor între zonele de câmpie, de podiș și montane (Figura 5.2). Al, Ba, Cr, Cu, Pb și Zn diferă semnificativ între zonele de câmpie și cele de podiș și montane, în timp ce Cd și Sr au prezentat diferențe semnificative numai între zonele de câmpie și cele montane. Concentrațiile mediane au fost în general mai mari în zonele de câmpie, cu excepția Pb și Cd, care au prezentat valori mai ridicate la altitudini mai mari.

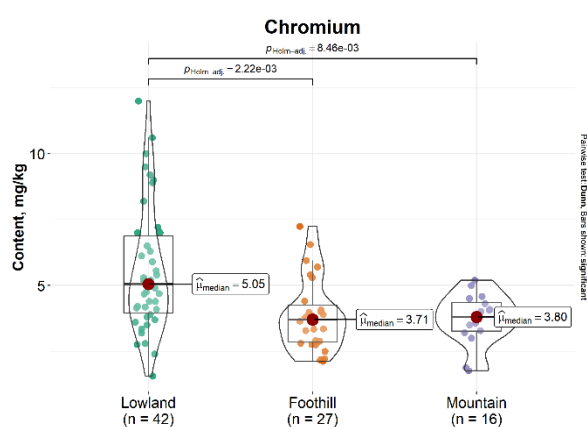
Comparația între zonele climatice a demonstrat diferențe semnificative pentru Ba între Dfa (Continental, fără sezon uscat, vară caldă) și Dfb (Continental, fără sezon uscat, vară temperată); pentru Cd între BSk (Arid, stepă, rece) și Cfa (Temperat, fără sezon uscat, vară caldă), și pentru Pb, Sr și Zn între Cfa și Dfa. Probele asociate cu BSk au fost caracterizate prin concentrații mediane mari de Al, Co, Cr, Fe, Sr și Zn, alături de concentrații comparativ scăzute de Cd și Pb, care posibil pot fi atribuite eroziunii eoliene și caracteristicilor litologice locale.



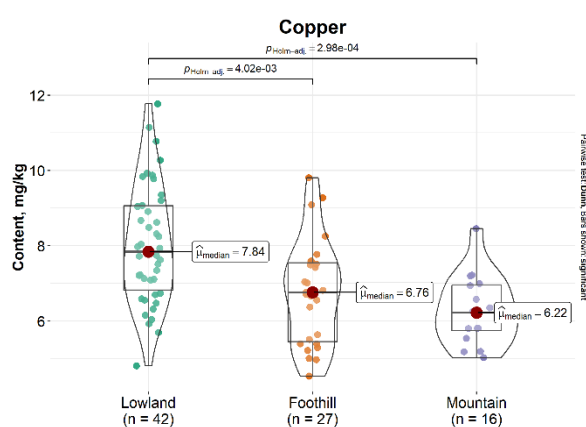
(a)



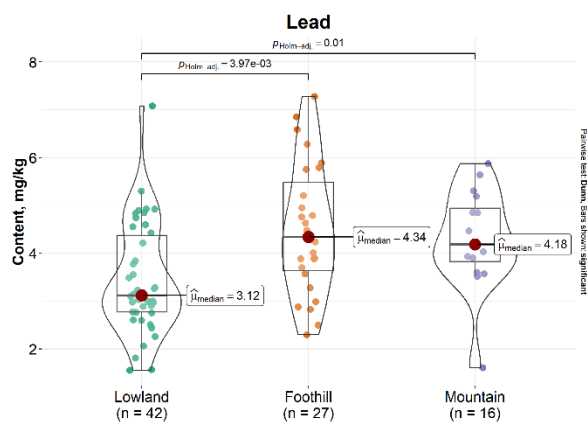
(b)



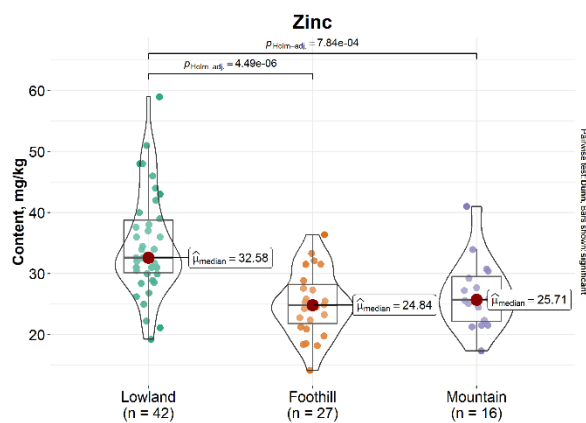
(c)



(d)



(e)



(f)

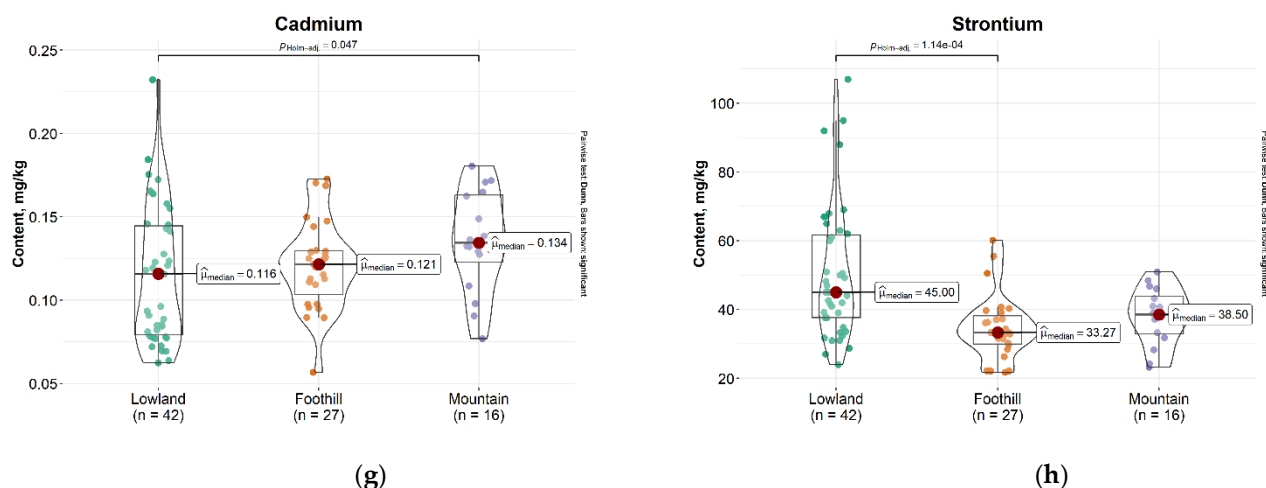


Figure 5.2. Diagrame boxplot ale conținutului elementar în zonele de altitudine. Diferențele semnificative în perechi (Kruskal-Wallis cu Dunn post-hoc, $p < 0,05$) sunt indicate prin linii de legătură.

În pofida absenței diferențelor semnificative în parametrii de mediu analogici între țări, au fost observate diferențe în compoziția elementară: probele din Moldova au fost îmbogățite în Al, Ba, Cr, Sr și Zn, în timp ce probele din Georgia au prezentat concentrații mai mari de Cd, Mn și Pb. PCA pe întregul set de date (Figura 5.3) a arătat că primele două componente captează 58,7% din varianța totală (PC1: 40,3%, PC2: 18,4%). PC1 este asociată în principal cu Fe, Cr, Al, Co, V, Ni, Cu și Ba, în timp ce PC2 este în mare măsură guvernat de Pb, Cd, Sr și Zn. Contribuția pronunțată a elementelor litofile la PC1 implică o influență dominantă a surselor geogene, care poate fi atribuită în mare parte alterării naturale în probele din Moldova. Astfel de procese sunt amplificate de eroziunea pronunțată a solului și de suspendarea atmosferică a particulelor minerale, favorizate de acoperirea vegetală redusă și condițiile climatice aride [20]. Încărcarea comparativ scăzută a cuprului pe PC1 indică o legătură redusă cu sursele geogene, sugerând o contribuție antropogenă, Cu fiind utilizat pe scară largă ca pesticid în Moldova.

Biplotul PCA arată că altitudinea, panta și precipitațiile se aliniază strâns cu direcția pozitivă a PC2, unde Pb și Cd prezintă, de asemenea, corelații pozitive, indicând că altitudinile mai mari, terenul mai abrupt și precipitațiile mai abundente sunt asociate cu o acumulare sporită a acestor metale. Această relație este explicată mecanic prin ridicarea orografică și precipitațiile mai intense, care elimină eficient poluanții atmosferici [25].

Conform testului Wilks, țara este variabila calitativă care contribuie cel mai mult la explicarea distanțelor dintre punctele individuale în biplotul PC1–PC2, urmată de zonele de altitudine, acoperirea terenului, clima și tipul de teren, în ordine descrescătoare a importanței. Această ordonare ierarhică confirmă că factorii geologici la nivel național au cea mai puternică influență, urmați de gradientii de mediu cu granularitate progresiv mai fină.

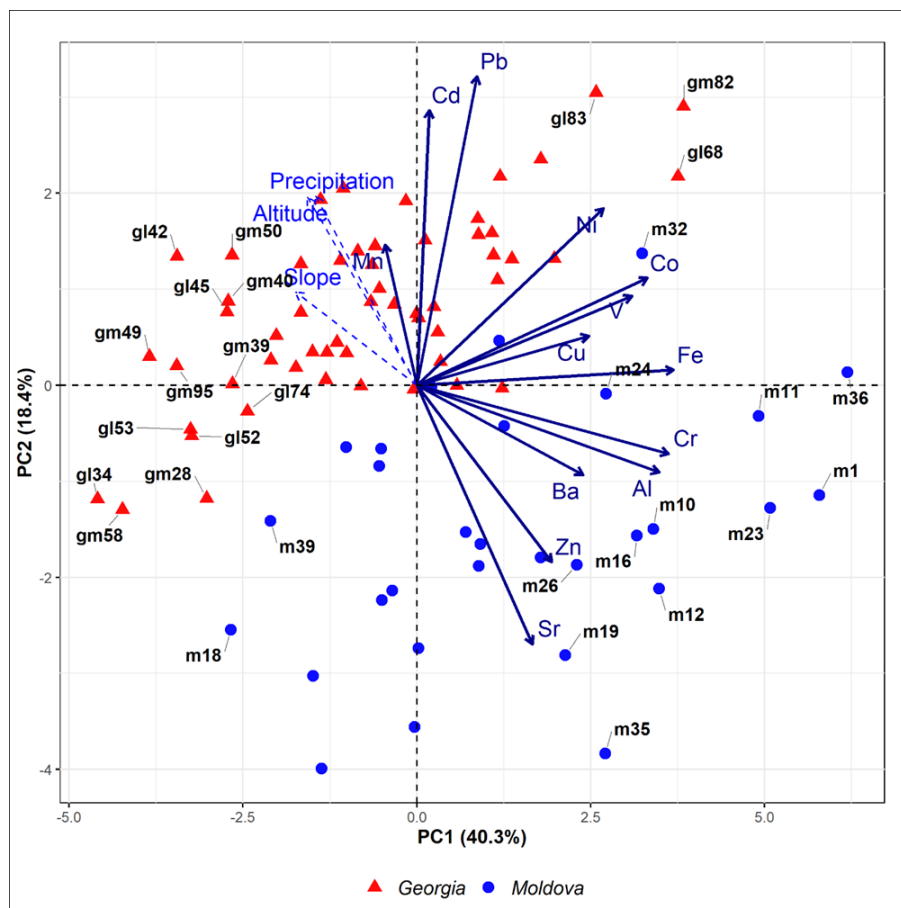


Figura 5.3. Diagrama biplot a primelor două componente principale, ce exprimă 58,7% din varianța datelor. Eșantioanele sunt marcate cu o combinație unică de culoare și simbol, în funcție de țară. Variabilele apar ca săgeți de la origine, iar variabilele calitative sunt reprezentate ca săgeți punctate.

Conform rezultatelor PCA, probele m8, m19, m13, m34, m41 și m35 formează un cluster pe axa negativă, caracterizat prin încărcături ridicate de Sr și Zn, cuplate cu contribuții scăzute ale Cd, Pb, altitudinii, precipitațiilor și pantei. Conform Kabata-Pendias et al. [21], cele mai mari concentrații de Sr sunt observate în mod tipic în soluri luto-argiloase formate în condiții calde și aride. În Moldova, eroziunea pe terenurile în pantă cu soluri lutoase erodabile creează condiții favorabile mobilizării particulelor de sol bogate în Sr [26]. Cernoziomurile carbonatate, caracterizate prin textură lutoasă, sunt deosebit de vulnerabile la eroziune și sunt distribuite mai ales în sudul și sud-estul țării, unde predomină condițiile climatice BSk.

CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

Studiul de față confirmă că biomonitorizarea cu mușchi reprezintă o abordare eficientă și fiabilă pentru evaluarea depunerilor atmosferice în regiuni caracterizate prin condiții fizico-geografice contrastante. Pe baza studiilor realizate în Georgia (2014–2023) și în Republica Moldova (2020–2021), au fost stabilite concentrațiile elementare de referință, identificate

principalele surse de poluare și, în mod deosebit, a fost demonstrat rolul semnificativ al factorilor climatici și geomorfologici în controlul acumulării elementelor potențial toxice în mușchi.

1. Acumularea elementelor în mușchi este determinată atât de condițiile de mediu, cât și de sursele de emisie, generând modele spațiale distincte. În Georgia predomină acumularea elementelor litogene (Al, Sc, Ti, V, Cr, Fe, Co) și a elementelor de pământuri rare, asociată reliefului montan și particularităților geologice, iar în Republica Moldova sunt caracteristice concentrații mai ridicate de Al, Fe, Ni, V, Cr, Sr, Zn și As, corelate cu relieful de câmpie, climatul mai arid și intensitatea utilizării agricole a terenurilor, care promovează procesele de resuspensie a solului și de depunere uscată
2. Analiza seriilor temporale a demonstrat o tendință generală de diminuare a depunerilor atmosferice ale elementelor potențial toxice în Republica Moldova (reducerea substanțială a depunerilor de Cr, As, Sb, Cd, Pb și Cu între 2015 și 2020) și Georgia (trend descendent pentru majoritatea elementelor între 2014–2017 și 2019–2023), reflectând modificarea intensității emisiilor și a gestionării mediului. Menținerea unor anomalii spațiale locale indică persistența unor surse punctuale de poluare.
3. Analiza multivariată a demonstrat că variabilitatea compoziției elementare este controlată de contribuția combinată a surselor geogene și antropogene. Au fost identificate trei categorii majore de surse: (i) surse geogene – materiale crustale și praf de sol (Al, Fe, Cr, Co, V, elemente de pământuri rare; (ii) surse antropogene – emisii generate de trafic și activități industriale (Pb, Zn, Cd, Cu, Hg); și (iii) surse mixte asociate practicilor agricole (Cu, Br, Cl, K în Moldova) și activităților miniere (Mn, As în Georgia).
4. Factorii climatici și geomorfologici reprezintă determinanți majori ai depunerilor atmosferice și ai acumulării elementelor potențial toxice în mușchi. Elementele litogene (Al, Cr, Ba și Zn) au prezentat corelații negative cu precipitațiile și altitudinea, indicând predominanța acestora în regiunile cu climat mai arid și resuspensia intensă a particulelor de sol. Cd și Pb au fost corelate pozitiv cu altitudinea și precipitațiile, reflectând intensificarea depunerilor umede și influența efectelor orografice în zonele montane. Diferențele semnificative între zonele de altitudine și clasele climatice Köppen-Geiger confirmă rolul determinant al factorilor climatici și geomorfologici în variabilitatea depunerilor atmosferice.
5. Analiza spațială și indicii de poluare au identificat puncte fierbinți de contaminare suprapuse peste fondul regional al depunerilor atmosferice. Aceste puncte sunt asociate activităților miniere, industriale și urbane, reprezentate de complexul minier Chiatura și Uzina de feroaliaje Zestafoni din Georgia, respectiv municipiile Chișinău și Bălți din Republica Moldova.

Evaluarea riscului ecologic indică un risc redus până la moderat la nivel național, cu intensificări locale în zonele evidențiate.

6. Cadrul metodologic propus permite biomonitorizarea comparativă a depunerilor atmosferice în condiții de mediu contrastante. Utilizarea speciei *Hypnum cupressiforme* ca biomonitor comun și eliminarea valorilor aberante au redus influența surselor locale de poluare, permițând identificarea modelelor regionale și evaluarea robustă a efectelor factorilor climatici și geomorfologici asupra acumulării elementelor.

Contribuție științifică: Integrarea factorilor de mediu în interpretarea datelor biomonitorizării: Studiul demonstrează că biomonitorizarea cu mușchi poate fi utilizată nu doar pentru a evalua nivelurile de poluare, ci și pentru a identifica procesele de mediu care controlează depunerea atmosferică. Acesta arată că variabilitatea climatică și complexitatea reliefului modulează semnificativ transportul, depunerea și acumularea poluanților, aspecte care trebuie luate în considerare pentru o evaluare precisă a impactului asupra mediului.

Recomandări practice:

1. Integrarea factorilor de mediu în interpretarea datelor biomonitorizării: Interpretarea datelor biomonitorizării cu mușchi ar trebui să țină cont în mod explicit de condițiile climatice și geomorfologice. În regiunile aride, cu treptele de relief joase, concentrațiile mari de elemente litogene pot reflecta resuspensia solului mai degrabă decât poluarea directă, în timp ce în regiunile muntoase și umede, acumularea crescută a anumitor elemente poate fi asociată cu depunerea umedă și procesele orografice. Ignorarea acestor factori poate duce la interpretarea greșită a nivelurilor și surselor de poluare.
2. Dezvoltarea și aplicarea valorilor de fond specifice regiunii: Concentrațiile de fond stabilite folosind abordarea percentilei 10 ar trebui aplicate ca valori de referință adaptate condițiilor fizico-geografice specifice fiecărei regiuni. Aceste valori ar trebui actualizate periodic pentru a reflecta schimbările de mediu.
3. Implementarea unor procese de monitorizare standardizate și comparabile: Programele viitoare de biomonitorizare ar trebui să asigure consecvența metodologică, inclusiv utilizarea unei singure specii de mușchi sau a unor specii comparabile, densitatea standardizată a eșantionării și protocoale analitice armonizate, pentru a permite comparații fiabile între regiuni cu condiții de mediu diferite.
4. Implementarea managementului ecologic ținut al surselor de poluare identificate: Strategiile de atenuare ar trebui să se concentreze asupra punctelor cheie de poluare, inclusiv asupra zonelor miniere (Chiatura, Uravi), unităților industriale (Zestafoni, Kutaisi, Bălți) și emisiilor de transport, precum și asupra reducerii impactului a practicilor agricole.

5. Extinderea monitorizării pentru a capta variabilitatea mediului: Studiile viitoare ar trebui să extindă acoperirea spațială și temporală pentru a include o gamă mai largă de zone climatice, tipuri de relief și sisteme de utilizare a terenurilor, permițând o înțelegere mai cuprinzătoare a dinamicii depunerilor atmosferice în medii eterogene.

Sugestii pentru viitoare studii:

1. Extinderea acoperirii spațiale și temporale: Studiile viitoare ar trebui să includă ecosisteme îndepărtate și sensibile (de exemplu, zonele alpine din Georgia, zonele protejate din Moldova) pentru a stabili nivelurile reale de fond. Studiile repetate la intervale de 5 ani sunt esențiale pentru a urmări eficacitatea măsurilor de control al poluării și pentru a evalua impactul schimbărilor climatice asupra modelelor de depunere.
2. Integrarea abordărilor complementare de monitorizare: Combinarea biomonitorizării cu mușchi cu eșantionatoare pasivă de aer, colectoare de depunere și analiza solului ar oferi o înțelegere mai cuprinzătoare a dinamicii poluării atmosferice. Amprentarea izotopică (de exemplu, izotopi Pb, Sr) ar putea îmbunătăți acuratețea determinării surselor de poluare.
3. Investigarea mecanismelor de acumulare specifice speciei: Experimentele controlate ar trebui să examineze factorii fiziologici și morfologici care guvernează absorbția elementelor de către diferite specii de mușchi. Acest lucru ar îmbunătăți comparabilitatea studiilor care utilizează diferiți biomonitori.
4. Evaluarea impactului asupra sănătății: Cercetările viitoare ar trebui să coreleze datele obținute pentru mușchi cu biomonitorizarea umană și studiile privind sănătatea în zonele poluate (Kutaisi, Chișinău, regiuni miniere) pentru a evalua impactul poluării aerului asupra sănătății publice și pentru a sprijini dezvoltarea de politici bazate pe dovezi.
5. Dezvoltarea de modele predictive: Integrarea datelor privind biomonitorizarea cu mușchi cu variabilele de mediu bazate pe GIS (topografie, climă, utilizarea terenurilor) și modelele de transport atmosferic ar permite predicția spațială a modelelor de depunere și identificarea regiunilor vulnerabile la contaminarea în viitor. Această abordare ar putea fi extinsă și pentru alte țări din bazinul Mării Negre cu condiții fizico-geografice similare.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. WORLD HEALTH ORGANIZATION. *World health statistics 2022: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*. Geneva, 2022. [Accessed 31 January 2024]. Disponibil: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240051157>
2. KELLY, F.J., FUSSELL, J.C. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. In: *Atmospheric environment*. 2012, vol. 60, pp. 504–526. ISSN 1352-2310. Disponibil: DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.06.039

3. AMODIO, M., CATINO, S., DAMBRUOSO, P.R., et al. Atmospheric deposition: Sampling procedures, analytical methods, and main recent findings from the scientific literature. In: *Advances in Meteorology*. 2014, pp. 1–27. ISSN 1687-9309. Disponibili: DOI: 10.1155/2014/161730
4. XU, B., LI, Y., ZHAO, S., et al. Elevated wet deposition of micro- and nanoplastics in remote mountains driven by free tropospheric transport. In: *Journal of Hazardous Materials*. 2025, vol. 498, pp. 140010. ISSN 0304-3894. Disponibil: DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140010
5. TCHOUNWOU, P.B., YEDJOU, C.G., PATLOLLA, A.K., et al. Heavy Metal Toxicity and the Environment. In: *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*. Basel: Springer Basel, 2012, pp. 133–164. ISBN 978-3-7643-8339-8. Disponibil: DOI: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6
6. XU, Z., FU, Y., YING, Q., et al. Atmospheric deposition of pollutants at three altitudes on Mount Emei, Sichuan Basin, southwestern China. In: *Science of The Total Environment*. 2024, vol. 957, pp. 177806. ISSN 0048-9697. Disponibil: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177806
7. OECD. *Promoting Clean Urban Public Transportation and Green Investment in Moldova*. Paris: OECD Publishing, 2019. Green Finance and Investment. ISBN 978-92-64-41962-9. Disponibil: DOI: 10.1787/31925aae-en
8. FRONTASYEVA, M., HARMENS, H., UZHINSKIY, A., CHALIGAVA, O. et al. Mosses as biomonitors of air pollution: 2015/2016 survey on heavy metals, nitrogen and POPs in Europe and beyond. Dubna: JINR, 2020. ISBN 978-5-9530-0508-1.
9. UNECE. *Environmental Performance Reviews: Republic of Moldova: 3rd review*. UN: The United Nations, 2014. [Accessed 20 May 2025]. Disponibil: <https://unece.org/environment-policy/publications/3rd-environmental-performance-review-republic-moldova>
10. UNECE. *Environmental Performance Reviews: Georgia: 3rd review*. UN: The United Nations, 2016. [Accessed 2 February 2023]. Disponibil: <https://unece.org/environment-policy/publications/3rd-environmental-performance-review-georgia>
11. CHALIGAVA, O., SHETEKARI, S., BADAWY, et al. Characterization of Trace Elements in Atmospheric Deposition Studied by Moss Biomonitoring in Georgia. In: *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2021, vol. 80, nr. 2. ISSN 0090-4341. Disponibil: DOI: 10.1007/s00244-020-00788-x
12. ALAFARA, A.B., LATEEF, I., FOLAHAN, A.A., et al. Hydrometallurgical Processing of Manganese Ores: A Review. In: *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2014, vol. 02, nr. 03, pp. 230–247. ISSN 2327-4077. Disponibil: DOI: 10.4236/jmmce.2014.23028
13. CHIRAKADZE, A., BUACHIDZE, Z., KHOMERIKI, I.O., et al. Arsenic pollution of soils and morbidity prevalence in Racha-Lower Svaneti district of Georgia. In: *International Journal of Global Warming*. 2016, vol. 10, nr. 1–3, pp. 92–114. ISSN 1758-2083. Disponibil: DOI: 10.1504/IJGW.2016.077908
14. STAFILOV, T., ŠAJN, R., BARANDOVSKI, L., et al. Moss biomonitoring of atmospheric deposition study of minor and trace elements in Macedonia. In: *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2018, vol. 11, nr. 2, pp. 137–152. ISSN 1873-9318.
15. HRISTOZOVA, G., MARINOVA, S., SVOZILÍK, V., et al. Biomonitoring of elemental atmospheric deposition: spatial distributions in the 2015/2016 moss survey in Bulgaria. In: *Journal*

of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2020, vol. 323, nr. 2, pp. 839–849. ISSN 0236-5731. Disponibil: DOI: 10.1007/s10967-019-06978-9.

16. STEINNES, E., UGGERUD, H.T., PFAFFHUBER, K.A., BERG, T. Atmospheric deposition of heavy metals in Norway. National moss survey 2015. Kjeller: NILU, 2017. NILU rapport, 28/2016. [Accessed 5 February 2023]. Disponibil: <https://www.environmentagency.no/globalassets/publikasjoner/M594/M594.pdf>

17. TEPANOSYAN, G., SAHAKYAN, L., GEVORGYAN, A., FRONTASYEVA, M. Factors conditioning the content of chemical elements in soil and mosses in Armenia. In: *Journal of Trace Elements and Minerals*. 2022, vol. 2, pp. 100029. ISSN 2773-0506.

18. NURKASSIMOVA, M., OMAROVA, N., YUSHIN, N., et al. Assessment of air pollution in South Kazakhstan using moss (*Hylocomium splendens*) biomonitoring technique and neutron activation analysis. In: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2024. pp. 1–10. ISSN 0236-5731.

19. ZINICOVSCAIA, I., HRAMCO, C., DULIU, O.G., et al. Air pollution study in the Republic of Moldova using moss biomonitoring technique. In: *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 2017, vol. 98, pp. 262–269. ISSN 0007-4861. Disponibil: DOI: 10.1007/s00128-016-1989-y.

20. ZINICOVSCAIA, I., CHALIGAVA, O., YUSHIN, N., et al. Moss Biomonitoring of Atmospheric Trace Element Pollution in the Republic of Moldova. In: *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2022. Disponibil: DOI: 10.1007/s00244-022-00918-7.

21. KABATA-PENDIAS, A., SZTEKE, B. *Trace elements in abiotic and biotic environments*. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. ISBN 1482212811.

22. QI, M., WU, Y., ZHANG, S., LI, G., AN, T. Pollution Profiles, Source Identification and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil near a Non-Ferrous Metal Smelting Plant. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023, vol. 20, nr. 2, pp. 1004. ISSN 1661-7827. Disponibil: DOI: 10.3390/ijerph20021004.

23. SAGER, M. Urban Soils and Road Dust—Civilization Effects and Metal Pollution—A Review. In: *Environments*. 2020, vol. 7, nr. 11, pp. 98. ISSN 2076-3298. Disponibil: DOI: 10.3390/environments7110098.

24. CHALIGAVA, O., ZINICOVSCAIA, I., PESHKOVA, A., et al. Major and Trace Airborne Elements and Ecological Risk Assessment: Georgia Moss Survey 2019–2023. In: *Plants*. 2024, vol. 13, nr. 23. ISSN 2223-7747. Disponibil: DOI: 10.3390/plants13233298

25. WANG, X., YUAN, W., FENG, X., WANG, D., LUO, J. Moss facilitating mercury, lead and cadmium enhanced accumulation in organic soils over glacial erratic at Mt. Gongga, China. In: *Environmental Pollution*. 2019, vol. 254, pp. 112974. ISSN 0269-7491. Disponibil: DOI: 10.1016/j.envpol.2019.112974

26. BEJAN, I., SOCHIRCĂ, V., NAGACEVSCHI, T., ȚÎȚU, P. Spatial study of soil erosion in the Republic of Moldova. In: *Present Environment and Sustainable Development*. 2022, vol. 16, no. 2, pp. 259-271. ISSN 1843-5971. Disponibil: DOI: 10.47743/pesd2022162021

LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI LA TEMA TEZEI

2. Articole în reviste științifice

2.1. în reviste din bazele de date Web of Science și SCOPUS

1. ZINICOVSCAIA, I., HRAMCO, C., **CHALIGAVA, O.**, YUSHIN, N., GROZDOV, D., VERGEL, K., DUCA, G. Accumulation of Potentially Toxic Elements in Mosses Collected in the Republic of Moldova. In: *Plants*. 2021, vol. 10, nr. 3, pp. 471. Disponibil: DOI: 10.3390/plants10030471
2. **CHALIGAVA, O.**, SHETEKARI, S., BADAWY, W.M. *et al.* Characterization of Trace Elements in Atmospheric Deposition Studied by Moss Biomonitoring in Georgia. In: *Arch Environ Contam Toxicol*. 2021, vol. 80, pp. 350–367. Disponibil: DOI: 10.1007/s00244-020-00788-x
3. **CHALIGAVA, O.**, NIKOLAEV, I., KHETAGUROV, K., LAVRINENKO, Y., BAZAEV, A., FRONTASYEVA, M., VERGEL, K., GROZDOV, D. First Results on Moss Biomonitoring of Trace Elements in the Central Part of Georgia, Caucasus. In: *Atmosphere*. 2021, vol. 12, 317. Disponibil: DOI: 10.3390/atmos12030317
4. ZINICOVSCAIA, I., **CHALIGAVA, O.**, YUSHIN, N., GROZDOV, D., VERGEL, K., HRAMCO, C. Moss Biomonitoring of Atmospheric Trace Element Pollution in the Republic of Moldova. In: *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2022. Disponibil: DOI: 10.1007/s00244-022-00918-7
5. **CHALIGAVA, O.**, ZINICOVSCAIA, I., PESHKOVA, A., YUSHIN, N., FRONTASYEVA, M., VERGEL, K., NURKASSIMOVA, M., CEPOI, L. Major and Trace Airborne Elements and Ecological Risk Assessment: Georgia Moss Survey 2019–2023. In: *Plants*. 2024, vol. 13, nr. 23. Disponibil: DOI: 10.3390/plants13233298
6. **CHALIGAVA, O.**, ZINICOVSCAIA, I., CEPOI, L. Environmental Drivers of Trace Element Variability in *Hypnum cupressiforme* Hedw.: A Cross-Regional Moss Biomonitoring Study in Georgia and the Republic of Moldova. In: *Plants*. 2025, vol. 14, nr. 13, pp. 2040. Disponibil: DOI: 10.3390/plants14132040

3. Articole în lucrările conferințelor și altor manifestări științifice

3.3. în lucrările manifestărilor științifice incluse în Registrul materialelor publicate în baza manifestărilor științifice organizate din Republica Moldova

1. **CHALIGAVA, O.** Moss biomonitoring of air pollution in the vicinity of mines: Georgia case study. In: *Abstract Book “Technical Scientific Conference of Undergraduate, Master, PhD students, Technical University of Moldova”*, April 5-7, 2023, Chisinau, Republic of Moldova, vol. 4, pp. 39-42. ISBN 978-9975-45-956-3. ISBN 978-9975-45-960-0 (Vol. 4).

3a. Teze în lucrările conferințelor și altor manifestări științifice

3.2a. în lucrările manifestărilor științifice incluse în alte baze de date acceptate de către ANACEC

1. **CHALIGAVA, O.**, ZINICOVSCAIA, I., PESHKOVA, A., YUSHIN, N., FRONTASYEVA, M.V., VERGEL, K., GROZDOV, D. Evaluation of air quality in Georgia based on moss survey 2019-2022 results. In: *The 36th Task Force Meeting of the UNECE ICP Vegetation*, February 13-15, 2023. Hosted by UNECE.

2. **CHALIGAVA, O.**, ZINICOVSCAIA, I., PESHKOVA, A., YUSHIN, N., FRONTASYEVA, M.V., VERGEL, K., GROZDOV, D., CEPOI, L. Moss biomonitoring of atmospheric deposition of trace elements in Georgia in 2019-2022. In: *Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics, 29th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-29)*, May 29 – June 2, 2023. Dubna.
3. **CHALIGAVA, O.**, ZINICOVSCAIA, I., PESHKOVA, A., YUSHIN, N., FRONTASYEVA, M.V., VERGEL, K., GROZDOV, D., CEPOI, L. Analyzing the accumulation of trace elements in moss samples from agricultural and mountainous environments. In: *Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics, 30th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-30)*, April 14 – 18, 2024. Sharm El-Sheikh, Egypt, p. 27. ISBN: 978-5-9530-0613-2.
4. **CHALIGAVA, O.**, ZINICOVSCAIA, I., PESHKOVA, A., YUSHIN, N., FRONTASYEVA, M.V., VERGEL, K., GROZDOV, D., CEPOI, L. Comparison of the trace elements accumulation in moss samples collected in agricultural and mountainous areas. In: *The 37th Task Force Meeting of the UNECE ICP Vegetation*, February 19-21, 2024. Kaunas, Lithuania.

3.3a. în lucrările manifestărilor științifice incluse în Registrul materialelor publicate în baza manifestărilor științifice organizate din Republica Moldova

5. **CHALIGAVA, O.**, VERGEL, K., YUSHIN, N., FRONTASYEVA, M. Moss biomonitoring of air pollution in Georgia. In: *Ecological and environmental chemistry : - 2022, International Conference*, Ed. 7, 3-4 martie 2022, Chișinău. Chisinau: Centrul Editorial-Poligrafic al Universității de Stat din Moldova, 2022, Ediția 7, Vol.1, p. 142. ISBN 978-9975-159-07-4. Disponibil: <https://doi.org/10.19261/eec.2022.v1>
6. **CHALIGAVA, O.**, ZINICOVSCAIA, I., CEPOI, L. First steps in evaluating the role of wind-blown dust in moss biomonitoring. In: *“Natural sciences in the dialogue of generations”, National conference with international participation*, September 14-15, 2023, Chisinau, Republic of Moldova, p. 85. ISBN 978-9975-3430-9-1. Disponibil: https://ibn.idsi.md/en/vizualizare_articol/188955
7. **CHALIGAVA, O.** Assessing air quality through moss biomonitoring: insights into heavy metal pollution and its variability across regions. In: *“Natural sciences in the dialogue of generations”, International Conference*, September 12-13, 2024, Chisinau, Republic of Moldova, p. 30. ISBN 978-9975-62-756-6. Disponibil: https://ibn.idsi.md/en/vizualizare_articol/214960
8. **CHALIGAVA, O.** Geospatial and multivariate drivers of elemental composition in moss biomonitoring: insights from Georgia and Moldova moss survey 2020. In: *“Natural sciences in the dialogue of generations”, International Conference*, September 17-19, 2025, Chisinau, Republic of Moldova, p. 45. ISBN 978-9975-62-898-3. Disponibil: https://ibn.idsi.md/en/vizualizare_articol/242602

ADNOTARE

Chaligava Omari, „Aplicarea mușchilor ca bioindicatori pentru evaluarea stării ecologice a aerului atmosferic în condiții climatice și de relief dificile” teză de doctor în științe ale mediului, Chișinău, 2026

Structura tezei: Adnotare (în engleză și română), Introducere, Cinci capitole, Concluzii și recomandări, Bibliografie cu 365 surse, 26 figuri, 18 tabele, 140 pagini de text de bază. Rezultatele obținute au fost publicate în 15 lucrări științifice, inclusiv 6 articole în reviste indexate WoS/Scopus.

Cuvinte-cheie: Biomonitorizarea cu mușchi, depuneri atmosferice, elemente potențial toxice, evaluarea calității aerului, factori climatici, relief și topografie, Republica Moldova, Georgia, metode analitice.

Scopul tezei. Elucidarea eficacității metodei de biomonitorizare cu mușchi pentru evaluarea calității aerului atmosferic în zone cu diferite condiții fizico-geografice: studiu de caz pentru Republica Moldova și Georgia.

Obiectivele studiului sunt: Efectuarea biomonitorizării pasive cu mușchi în Republica Moldova și Georgia, regiuni caracterizate prin condiții climatice și de relief contrastante; Determinarea compoziției elementare a probelor de mușchi și analiza comparativă a variabilității lor spațiale și temporale; identificarea și diferențierea surselor naturale (geogene) și antropogene de poluare a aerului atmosferic în regiunile studiate; Evaluarea influenței factorilor climatici și topografici (precipitații, altitudine, pantă) asupra acumulării elementelor în mușchi; Elaborarea principiilor de stabilire a nivelurilor de fond ale poluării în diferite condiții climatice și de relief; elaborarea recomandărilor pentru aplicarea și interpretarea rezultatelor biomonitorizării cu mușchi în regiuni cu caracteristici fizico-geografice contrastante.

Noutatea și originalitatea științifică: Noutatea lucrării constă în evaluarea integrată a eficienței biomonitorizării cu mușchi în condiții climatice și de relief contrastante, utilizând o abordare comparativă între Republica Moldova și Georgia. Studiul demonstrează, pentru prima dată, rolul decisiv al factorilor topo climatici (precipitații, altitudine, teren) în controlul modelelor de depunere atmosferică și acumulare a elementelor în mușchi, dincolo de influența surselor de emisie.

Rezultatul obținut care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante constă în identificarea și fundamentarea factorilor climatici și geomorfologici ca determinanți - cheie ai depunerii atmosferice și ai acumulării elementelor în mușchi, printr-o analiză comparativă a regiunilor cu condiții fizico-geografice contrastante (Republica Moldova și Georgia), ceea ce a condus la o diferențiere mai clară între contribuțiile geogene și antropogene și la o interpretare mai exactă a datelor de biomonitorizare, în contextul aplicării biomonitorizării cu mușchi pentru evaluarea calității aerului în diverse condiții climatice și de relief.

Semnificația teoretică a tezei constă în extinderea conceptului de biomonitorizare prin încorporarea factorilor climatici și de relief ca factori cheie ai transportului și acumulării poluanților. Cercetarea contribuie la o înțelegere mai profundă a mecanismelor depunerii atmosferice (depunerea uscată și umedă), și a interacțiunii acestora cu condițiile de mediu în modelarea tiparelor geochimice în biomonitori.

Valoarea aplicativă a tezei: constă în dezvoltarea de recomandări metodologice pentru interpretarea datelor de biomonitorizare cu mușchi în regiuni cu condiții climatice și geomorfologice diferite. Rezultatele susțin stabilirea unor niveluri de fond specifice regiunii, îmbunătățirea strategiilor de monitorizare a mediului și identificarea mai precisă a surselor de poluare, oferind o bază pentru managementul de mediu și politică de dezvoltare.

Implementarea rezultatelor științifice: Rezultatele obținute în urma acestui studiu au fost incluse în raportul ICP Vegetation, contribuind astfel la dezvoltarea rețelei europene de monitorizare a metalelor grele în Europa și alte state.

ANNOTATION

Chaligava Omari, Application of mosses as bioindicators for evaluation of ecological state of air in difficult climatic and relief conditions. PhD thesis in ecology sciences, Chisinau, 2026

Structure of the thesis: Abstract (in Romanian and English), introduction, five chapters, conclusions and recommendations, bibliography from 365 sources, 26 figures, 18 tables and 140 pages of main text. The results of the dissertation are reflected in 15 scientific publications, including 6 articles in peer-reviewed journals, indexed in WoS/Scopus.

Keywords: Moss biomonitoring, atmospheric deposition, potentially toxic elements, air quality assessment, climatic factors, relief and topography, Republic of Moldova, Georgia, analytical techniques

The aim of the thesis. To elucidate the effectiveness of the moss biomonitoring method for assessing the quality of atmospheric air in areas with different physico-geographical conditions: case study of Republic of Moldova and Georgia.

The objectives of the study are: carrying out passive moss biomonitoring in the Republic of Moldova and Georgia, regions characterized by contrasting climatic and relief conditions; determination of the elemental composition of moss samples and comparative analysis of their spatial and temporal variability; identification and differentiation of natural (geogenic) and anthropogenic sources of atmospheric air pollution in the studied regions; assessment of the influence of climatic and topographical factors (precipitation, altitude, slope) on the accumulation of elements in mosses; elaboration of principles for establishing background levels of pollution under different climatic and relief conditions; development of recommendations for the application and interpretation of moss biomonitoring results in regions with contrasting physico-geographical characteristics.

The novelty and scientific originality: The novelty of the work consists in the integrated evaluation of moss biomonitoring efficiency under contrasting climatic and relief conditions, using a comparative approach between the Republic of Moldova and Georgia. The study demonstrates, for the first time, the decisive role of topoclimatic factors (precipitation, altitude, terrain) in controlling atmospheric deposition patterns and element accumulation in mosses, beyond the influence of emission sources.

A result that contributes to the solution of a scientific problem consists in the identification and substantiation of climatic and geomorphological factors as key drivers of atmospheric deposition and element accumulation in mosses, through a comparative analysis of regions with contrasting physico-geographical conditions (Republic of Moldova and Georgia), which led to improved differentiation between geogenic and anthropogenic contributions and to more accurate interpretation of biomonitoring data, in the context of applying moss biomonitoring for air quality assessment under diverse climatic and relief conditions.

The theoretical importance of the work lies in extending the conceptual framework of biomonitoring by incorporating climatic and relief factors as key drivers of pollutant transport and accumulation. The research contributes to a deeper understanding of the mechanisms of atmospheric deposition, including dry and wet processes, and their interaction with environmental conditions in shaping geochemical patterns in biomonitors.

The applied value of the work consists in the development of methodological recommendations for the interpretation of moss biomonitoring data in regions with different climatic and geomorphological conditions. The results support the establishment of region-specific background levels, improvement of environmental monitoring strategies, and more accurate identification of pollution sources, providing a basis for environmental management and policy development. **The implementation of the results:** The obtained results of this study were included in ICP Vegetation survey report, thereby contributing to the European monitoring network for heavy metals across Europe and beyond.

CHALIGAVA OMARI

**APLICAREA MUȘCHILOR CA BIOINDICATORI PENTRU
EVALUAREA STĂRII ECOLOGICE A AERULUI
ATMOSFERIC ÎN CONDIȚII CLIMATICE ȘI DE RELIEF
DIFICILE**

166.01 ECOLOGIE

Teză de doctor în științe ale mediului

Aprobat pentru tipar: 10.10.2026
Hârtie offset. Tipar digital.
Coli de tipar: 1,6

Formatul hâtriei
Tiraj 25 exemplare
Comanda nr.

Tipografia Artpoligraf SRL

str. Henri Coanda 7, MD 2004

office@artpoligraf.md