



Научная статья
УДК 336.76
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.4.1>

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЧВ ПОД ГОРНО-ЛУГОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Татьяна Васильевна Дегтярева^{1*},
Андрей Александрович Лиховид²

^{1,2} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ dtb.70@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8205-4268>

² info@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2190-301X>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования является микроэлементный состав почв под горно-луговой растительностью Западного Кавказа в районе Архыза. В работе использованы традиционные методические приемы для изучения микроэлементного состава почв горных регионов: полевые почвенно-геохимические исследования, камеральная обработка материалов, аналитические обобщения. Установлено, что формирование микроэлементного состава почв под горно-луговой растительностью в высокогорной зоне Архыза обуславливается особыми условиями, свойственными этой части Западного Кавказа: высоким уровнем солнечной инсоляции в течение всего года, повышенным увлажнением, большим количеством поступающих органических остатков в почвы. В качестве фаз-носителей микроэлементов в горно-луговых почвах региона выступают хелатирующие органоминеральные комплексы, оксиды и гидрооксиды Fe и Mn, продукты выветривания алюмосиликатов в виде гидрослюд, хлоритов, минералов группы каолинита. Преимущественное связывание с хелатными органоминеральными комплексами характерно для Zn и Cu, имеющими высокое сродство к органическому веществу в условиях кислой среды. Закрепление на оксидах и гидрооксидах Fe и Mn, глинистых минералах свойственно практически всем рассматриваемым микроэлементам в разной степени в зависимости от степени прочности образующихся связей. По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что проявления природных особенностей развития поч-

венного покрова исследуемой территории вызывают усиление роли хелатирующих органоминеральных комплексов в связывании микроэлементов в почвах и ослаблении влияния продуктов выветривания первичных минералов на распределение металлов по профилю почв. Основными зонами накопления микроэлементов в горно-луговых почвах являются внутрипочвенные геохимические барьеры – биогеохимический, сорбционный, альфегумусовый. Антропогенное воздействие на почвенный покров высокогорных ландшафтов Архыза носит локально выраженный характер и существенно не отражается на микроэлементном составе почв.

Ключевые слова: Западный Кавказ, микроэлементы, горно-луговые почвы, трансэлювиальные ландшафты, мезокатена, геохимические барьеры

Для цитирования: Дегтярева Т. В., Лиховид А. А. Основные закономерности формирования микроэлементного состава почв под горно-луговой растительностью Западного Кавказа // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 4. С. 11–28. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.4.1>

Конфликт интересов: один из авторов статьи – доктор географических наук, профессор Лиховид Андрей Александрович является членом редакционного совета журнала «Наука. Инновации. Технологии». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 30.09.2024;
одобрена после рецензирования 02.12.2024;
принята к публикации 17.12.2024.

**1.6.12. Physical Geography and Biogeography,
Soil Geography and Landscape Geochemistry
(Geographical Sciences)**
Research article

**The main patterns of forming
the microelement composition of soils under
mountain-meadow vegetation
in the Western Caucasus**

**Tatyana V. Degtyareva^{1*},
Andrey A. Likhovid²**

^{1,2} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ dtb.70@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8205-4268>

² info@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2190-301X>

* Corresponding author

Abstract.

The object of the study is the microelement composition of soils under the mountain meadow vegetation of the Western Caucasus in the Arkhyz area. The work uses traditional methodological techniques for studying the microelement composition of the soils of mining regions: field soil and geochemical studies, camera processing of materials and analytical generalizations. It was established that the formation of the microelement composition of soils under the mountain-meadow vegetation in the highland zone of Arkhyz is determined by the special conditions inherent in this part of the Western Caucasus: a high level of solar insolation throughout the year, increased moisture and a large number of incoming organic residues in the soil. Chelating organomineral complexes, Fe and Mn oxides and hydroxides, the products of aluminosilicates in the form of hydrosperes, chlorites, and minerals of kaolinitis acts as phase and lumbar soils of the region. The predominant binding with chelate organomineral complexes is characteristic of Zn and Cu, which have a high affinity to organic matter in an acidic environment. Consolidation on Fe and Mn oxides and hydroxides, clay minerals is characteristic of almost all microelements under consideration to varying degrees, depending on the gradation of strength of the formed connections. Based on the results of the study, we can conclude that the manifestations of the natural features of the development of the soil cover of the studied territory are strengthened by the role of chelating organomineral complexes in the binding of microelements in the soils and weakening of the influence of primary minerals products on the distribution of metals according to soil profile. The main zones of the accumulation of microelements in mountain-meadow soils are intracene geochemical barriers-biogeochemical, sorption and alphanhumus. The anthropogenic effect on the soil cover of the high-mountain landscapes of Arkhyz is locally pronounced and is not significantly reflected on the microelement composition of soils.

Keywords:

Western Caucasus, trace elements, mountain-meadow soils, transe-luvial landscapes, mesocatene, geochemical barriers

For citation:

Degtyareva TV, Likhovid AA. The main patterns of forming the microelement composition of soils under mountain-meadow vegetation in the Western Caucasus. Science. Innovations. Technologies. 2024;(4):11-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.4.1>

Conflict of interest:

one of the authors of article — Andrey A. Likhovid, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, is a member of Editorial Council of journal "Science. Innovations. Technologies". The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this manuscript.

The article was submitted 30.09.2024;
approved after reviewing 02.12.2024;
accepted for publication 17.12.2024.

Введение

Микроэлементный состав почв является важной составной частью всей системы почвенных соединений [1]. Его формирование определяется как внешними, так и внутренними факторами развития почвенного покрова наземных экосистем [2, 3]. В горных регионах эти факторы приобретают свои особенности, связанные со специфическими для гор условиями почвообразования: наличием существенных перепадов высот, экспозиционных различий в протекании почвообразовательных процессов, усиленных гравитационных перемещений продуктов почвообразования, ослабленных связей между автономными и подчиненными местоположениями. Все это создает необходимость особого подхода к изучению микроэлементного состава горных почв, основанного на учете особенностей их формирования и специфике антропогенного воздействия на них, проявляющейся [4] с разной интенсивностью в горных регионах.

Цель исследования – определить особенности формирования микроэлементного состава почв под горно-луговой растительностью Западного Кавказа (в районе Архыза) на основе материалов собственных полевых исследований и анализа научной литературы по данной тематике. Изучение микроэлементного состава почв горных регионов имеет особое значение для определения допустимых уровней антропогенной нагрузки в условиях ее усиления.

Материалы и методы исследований

В основу исследования легли результаты почвенно-геохимического опробования, проведенного на территории Софийского ландшафта высокогорных лугов, выделенного [5] в западной части Тебердинского национального парка на восточных склонах Софийского хребта в районе Архыза (Западный Кавказ). Почвенные разрезы заложены в трансэлювиальных ландшафтах ландшафтно-геохимической мезокатены в высотных поясах альпийских и субальпийских лугов: ландшафт ТЭ₃ – умеренно крутые коллювиальные склоны восточной экспозиции цирка альпийского пояса, сложенные гранитоидами и коллювием, с альпийскими лишайниковыми пустошами на горно-луговых торфянисто-дерновых маломощных сильно скелетных почвах; ландшафт ТЭ₂ – коллювиальные

склоны юго-восточной экспозиции с альпийскими пестрокостровыми лугами на горно-луговых торфянисто-дерновых почвах; ландшафт ТЭ₁ – крутые склоны восточной экспозиции, сложенные коллювием, с субальпийскими лугами и антропофитами на месте бывших кошей (ветренцево-вейниково-овсянницевая ассоциация) на горно-луговых торфянисто-дерновых почвах (рис.).

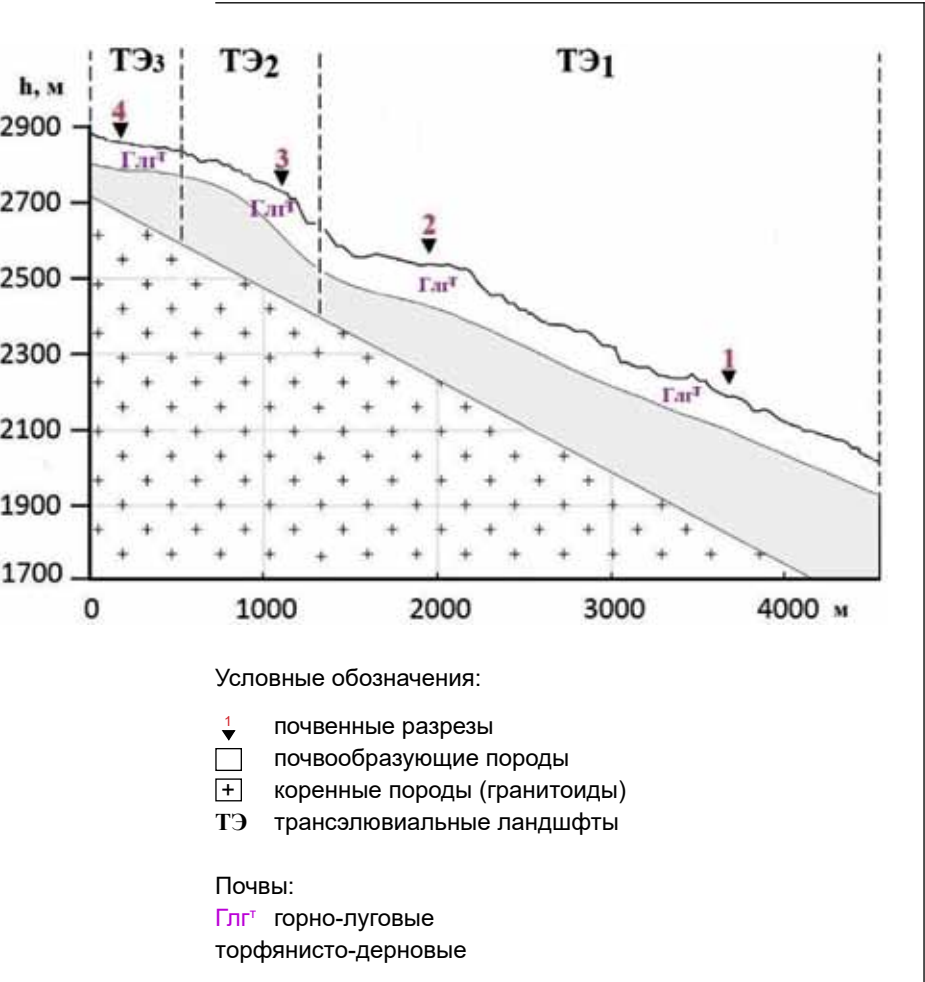


Рис. Схематический профиль ландшафтно-геохимической мезокатены на восточных склонах Софийского хребта.
Fig. Schematic profile of the landscape-geochemical mesocatene on the eastern slopes of the Sofia ridge

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors

В лабораторных условиях определены основные физико-химические свойства почв: pH водной вытяжки потенциометрическим методом; гумус почвы – методом мокрого озоления по И.В. Тюрину в модификации В.Н. Семакова; гранулометрический состав – методом лазерной дифрактометрии. Валовые содержания микроэлементов (Cu, Zn, Pb и Cd) определены в сухой пробе на рентгенфлуоресцентном спектрометре («Xenometrix EX-Calibur»). Микроэлементный состав горно-луговых почв сравнивался с кларками почв мира по А. П. Виноградову [6]. При определении особенностей радиального распределения микроэлементов использован коэффициент радиальной дифференциации (R), равный отношению содержания химического элемента в генетическом горизонте почв к его содержанию в почвообразующей породе или горизонте ВС.

Важной составляющей исследования стал анализ отечественной и зарубежной литературы по тематике исследования, позволяющий отразить современное состояние научной проблемы и пути ее решения учеными различных направлений. Изучались как методологические подходы, так и практические результаты исследований микроэлементного состава почв горных регионов [7–9].

Результаты исследований и их обсуждение

Территория располагается в пределах северного макросклона Западного Кавказа, для которого характерно повышенное количество осадков (1750–1850 мм) в связи с поступлением насыщенных влагой воздушных масс с Черноморского региона. Это создает избыточное увлажнение почвенного покрова высокогорий в течение всего вегетационного периода, который на изученных высотах (2200–2800 м н.у.м.) длится около 160 дней в году [5]. За этот период в альпийском и субальпийском поясе создается значительное количество фитомассы горных лугов. По данным В.А. Шальнева и Д.В. Юрина [5], в субальпийских среднетравных лугах Софийского высокогорного ландшафта на высоте 2450 м н.у.м. полные запасы надземной фитомассы составляют 104,5 г/м², а в субальпийских высокотравных лугах с синантропами – до 288 г/м². Из субальпийской луговой растительности доминируют: ветреница пучковатая (*Anemone fasciculata*), вейник тростниковидный

(*Calamagrostis arundinacea*), овсяница разноцветная (*Festuca varia*). Доминирующими видами альпийских пестрокостровых лугов являются кострец пестрый (*Bromopsis variegata*), колокольчик Биберштейна (*Campanula biebersteiniana*), осока печальная (*Carex tristis*), вероника горечавковая (*Veronica gentianoides*), минуарция горная (*Minuartia aizoides*). Альпийские лишайниковые пустоши формируются тмином кавказским (*Carum caucasicum*), горечавкой пиренейской (*Gentiana pyrenaica*), осокой вечнозеленой (*Carex sempervirens*), цетрарией исландской (*Cetraria islandica*).

Разложение и гумификация органических остатков протекает в условиях переувлажнения и невысоких температур (средняя t июля $9,1^{\circ}\text{C}$), что способствует развитию мощного дернового горизонта с признаками оторфовывания. Наличие бескарбонатных почвообразующих пород (продуктов разрушения верхнепалеозойских гранитоидов) приводит к образованию сиаллитных минералов в составе почвенного мелкозема, содержащих значительное количество Fe и Mn в форме связанных минералов. Их высвобождение осуществляется в результате процессов внутрипочвенного выветривания, при которых происходит ожелезнение почвенного профиля с накоплением свободных аморфных и окристаллизованных оксидов и гидроксидов Fe [10]. В почве создается запас очень сорбционноемких по отношению к микроэлементам соединений Fe (и Mn) [1, 11], которые способны удерживать в связанном состоянии большое количество поступающих масс Pb (до 48,5%), Zn (10–17 %) [12], Cu и Cd – до 40–60 % от общего содержания в почве [1, 13].

Другим важным компонентом почвы, участвующим в закреплении микроэлементов, являются хелатные органоминеральные комплексы, образованные по типу ковалентных связей с включением ионов металлов в состав кристаллических решеток минералов или функциональных групп гумусовых кислот [7]. Их подвижность по почвенному профилю зависит от щелочно-кислотных условий среды и для горно-луговых почв является высокой в силу складывающихся здесь кислых значений pH. Это обуславливает высокую миграционную подвижность микроэлементов, переносимых в составе хелатных органоминеральных комплексов по почвенному профилю.

Существенную роль в связывании микроэлементов в горно-луговых почвах играют продукты внутрипочвенного выветривания первичных минералов почвообразующих пород. В их составе преобладают гидрослюды, хлориты, минералы каолининовой группы [10].

Закрепление микроэлементов происходит преимущественно путем адсорбции на поверхности гидрослюд за счет возникновения электростатических сил, обеспечивающих достаточно прочное связывание металлов и алюмосиликатов [14, 15]. Такие процессы подтверждаются установленной ранее [9] концентрацией Cu и Zn на гидрослюдах, образующихся в почвенном мелкозем высокогорных областей Большого Кавказа.

Изменение гранулометрического состава горно-луговых почв с глубиной вызывает образование в средней части почвенного профиля сорбционного геохимического барьера, на котором могут закрепляться микроэлементы, адсорбированные илстыми фракциями [16, 17]. Эти процессы, вероятно, в большей степени выражены для горно-луговых почв под субальпийским луговым высокотравьем, которым свойственен более тяжелый гранулометрический состав и более интенсивные процессы оглинивания [18].

Горно-луговые почвы района исследования представлены двумя подтипами: горно-луговыми альпийскими и горно-луговыми субальпийскими. Морфологическое описание горно-луговых почв приведено ниже на примере разреза, заложенного в средней части коллювиального склона юго-восточной экспозиции на высоте 2750 м н.у.м., с альпийской растительностью, в составе которой: кострец пестрый (*Bromopsis variegata*), осока печальная (*Carex tristis*), вероника горечавковая (*Veronica gentianoides*), лютик горный (*Ranunculus oreophilus*), минуарция горная (*Minuartia aizoides*). Вскипание отсутствует по всему почвенному профилю.

Адг 0–4 (4) см. Луговой оторфованный войлок темно-бурого цвета в разной степени разложения.

А 4–14 (10) см. Темный буро-коричневый, влажный, среднесуглинистый. Непрочно-мелко-зернистый, рыхлый, сильнодерновый, сильноскелетный. Переход ясный.

В 14–27 (13) см. Ярко буро-рыжий, влажный, среднесуглинистый. Непрочно-мелкокомковатый, рыхлый, корешковатый, сильноскелетный. Переход постепенный.

ВС 27-42 (15) см. Буровато-палевый, влажный, среднесуглинистый, бесструктурный. Сильноскелетный, уплотненный, корешковатый. Переход постепенный.

С 42 (дно разреза) см. Коллювий гранитоидов.

Почва: Горно-луговая альпийская торфянисто-дерновая среднемошная среднесуглинистая сильноскелетная на коллювии гранитоидов.

Изученным горно-луговым почвам свойственна сильноокислая и кислая реакция среды (таблица). В гумусовом горизонте горно-луговых почв под альпийскими лишайниковыми пустошами (ландшафт ТЭ₃) преобладают сильноокислые условия (рН = 4,2 ± 0,1; n=3). В гумусовом горизонте почв трансэлювиальных ландшафтов с альпийскими пестрокустаровыми лугами (ландшафт ТЭ₂) и субальпийскими лугами (ландшафт ТЭ₁) установлена кислая реакция среды: рН = 4,9 ± 0,1 (n = 4) и рН = 5,4 ± 0,1 (n = 10) соответственно. В нижней части почвенного профиля реакция среды становиться слабокислой.

Таблица.

МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ГОРНО-ЛУГОВЫХ ПОЧВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Table. Microelements composition of mountain-meadow soils of elementary landscapes

Ландшафт	КК	КР	Преобладающее распределение по почвенному профилю (нижний индекс – значение R)			
	Относительно кларка почв [6]		Поверхностно-аккумулятивное	Поверхностно-аккумулятивное элювиально-иллювиальное	Элювиально-иллювиальное	Элювиальное
ТЭ3	Pb (3,9), Cu (3,6), Zn (2,4)	Cd (2,8)	Zn _{1,9} Cu _{1,5}	—	Pb _{0,9}	Cd _{0,3}
ТЭ2	Pb (3,9), Cu (3,3), Zn (2,3)	Cd (1,1)	Zn _{1,6} Cu _{1,2}	—	Cd _{0,9} Pb _{0,9}	—
ТЭ1	Pb (3,5), Cu (2,8), Zn (2,3)	Cd (1,1)	Cu _{1,4} Zn _{1,3}	—	Cd ₁ Pb _{0,8}	—

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

Содержание углерода органического вещества высокое и имеет значения: в гумусовом горизонте горно-луговых почв под альпийскими лишайниковыми пустошами – $13,6 \pm 1,5\%$ ($n=3$); у горно-луговых почв под альпийскими пестрокостровыми лугами – $14 \pm 1,9\%$ ($n = 4$); у горно-луговых почв под субальпийскими лугами – $15,1 \pm 1,7\%$ ($n = 10$). Дисперсионный анализ показал, что по содержанию гумуса в горизонте А, рассмотренные горно-луговые почвы под разными типами горных лугов не имеют статистически значимых различий, что свойственно для высокогорных почв согласно исследованиям других ученых [19].

В гумусовом горизонте горно-луговых почв под альпийскими лишайниковыми пустошами содержание физической глины составляет $23,2 \pm 1,4\%$, что говорит о легкосуглинистом гранулометрическом составе. В горно-луговых почвах под альпийскими пестрокостровыми лугами установлен среднесуглинистый гранулометрический состав с содержанием физической глины в $32 \pm 2,5\%$ ($n = 4$). Почвы субальпийских лугов отличается также среднесуглинистый гранулометрический состав с количеством физической глины в $35,2 \pm 3,7\%$ при $n=10$. Профильное распределение фракции физической глины – элювиально-иллювиальное с максимальным накоплением в средней части почвенного профиля.

Микроэлементный состав гумусовых горизонтов изученных горно-луговых почв характеризуется вышекларковыми (относительно мирового кларка почв) содержаниями Pb, Cu и Zn; нижекларковыми – Cd. Значительным валовым содержанием Zn отличаются почвы трансэлювиальных ландшафтов с субальпийскими лугами (до $120,3$ мг/кг). Также высокое валовое содержание Zn свойственно почвам трансэлювиальных ландшафтов под альпийскими пестрокостровыми лугами (до $115,5$ мг/кг). Данные значения находятся в пределах, установленных для высокогорных почв Северного Кавказа на гранитоидах [20].

Радиальная дифференциация валового содержания Zn в горно-луговых почвах под альпийскими лишайниковыми пустошами происходит по контрастному поверхностно-аккумулятивному распределению ($R = 1,9$), в горно-луговых почвах под альпийскими и субальпийскими лугами также имеет поверхностно-аккумулятив-

ное распределение при значениях $R = 1,3-1,6$. Установлены статистически значимые ($p < 0,05$) корреляционные связи между валовым содержанием Zn и гумусом (высокая прямая с $r = 0,81$; $n = 51$) и pH (средняя обратная с $r = -0,62$; $n = 51$). Это дает возможность предположить значительное нахождение Zn в составе органоминеральных соединений, в том числе и хелатных. Известно, что Zn в кислых условиях является достаточно подвижным химическим элементом. Но в данном случае, вероятно, происходит его значительное удержание в верхней части почвенного профиля, насыщенного помимо гумуса, большим количеством оксидов и гидроксидов Fe , продуктами внутрисочвенного выветривания первичных минералов почвообразующих пород (гидрослюдами, хлоритами и др.).

Валовое содержание Cu по данным множественного сравнения с использованием параметрического критерия Ньюмена-Кейлса в горно-луговых альпийских почвах статистически значимо выше, чем в горно-луговых субальпийских почвах. Радиальное распределение валового содержания Cu в профиле изученных разрезов имеет поверхностно-аккумулятивный характер в горно-луговых почвах под альпийскими пестрокостровыми лугами ($R = 1,5$), а также под альпийскими лишайниковыми пустошами и субальпийскими лугами ($R = 1,2-1,4$). Корреляционный анализ показал статистически значимые ($p < 0,05$) средние прямые корреляции валовых содержаний Cu с гумусом ($r = 0,56$; $n = 51$) и фракцией физической глины ($r = 0,5$; $n = 51$). Можно предположить о связывании Cu в составе органоминеральных комплексов, вторичных алюмосиликатов, железистых соединений.

Распределение валового содержания Pb в горно-луговых почвах (гумусовый горизонт) не имеет статистически значимых различий ($n = 17$). В радиальной дифференциации валовых содержаний Pb по почвенным профилям установлено неконтрастное элювиально-иллювиальное распределение в горно-луговых почвах под альпийскими лишайниковыми пустошами, под альпийскими пестрокостровыми лугами и под субальпийскими лугами ($R = 0,8-0,9$). Корреляционный анализ показал наличие статистически значимой ($p < 0,05$) слабой прямой корреляции между валовыми содержаниями Pb и pH ($r = 0,33$; $n = 51$) и слабой обратной корреляции между Pb и гумусом ($r = -0,39$; $n = 51$). Можно говорить о

процессах выноса соединений Pb из гумусового горизонта в условиях сильноокислой среды. Вероятно также, что сказывается влияние высоких концентраций элемента в почвообразующей породе, обусловленное наличием в ней максиминералов Pb галенита и церуссита [9]. Исследованиями установлено, что Pb (II) в кислых условиях «при pH ниже 5,6–6 поглощается составляющими почв по механизму ионного обмена, причем оксиды и гидроксиды Fe более селективны к этим ионам, чем гидроксиды Mn, силикаты и органическое вещество» [21, с. 427].

Распределение валовых содержаний Cd по результатам множественного сравнения с использованием параметрического критерия Ньюмена-Кейлса в гумусовых горизонтах горно-луговых субальпийских почв статистически значимо выше, чем в горно-луговых альпийских ($n = 17$). В радиальной дифференциации Cd встречаются разные распределения: элювиальное и элювиально-иллювиальное (R от 0,3 до 1,0). В кислых условиях среды миграция Cd достаточно интенсивна и, вероятно, может создавать сильно дифференцированную картину.

Латеральная структура распределения валовых содержаний характеризуется тем, что большинство изученных микроэлементов (Zn, Cu и Pb) имеют монотонный вид латерально-миграционной дифференциации (без существенных геохимических различий с $L \leq 1,3$). Для Cd свойственен аккумулятивный вид латерально-миграционной дифференциации ($L > 1,3$) с увеличением средних значений в почвах подчиненных ландшафтов.

Таким образом, для почв горно-лугового пояса высокогорной растительности Западного Кавказа характерным является закрепление микроэлементов в составе образующихся хелатных органоминеральных комплексов, оксидов и гидрооксидов Fe и Mn, продуктов выветривания алюмосиликатов. Формирование внутрипочвенных геохимических барьеров происходит главным образом за счет накопления органического вещества в верхней части почвенного профиля (биогеохимический барьер), за счет процессов иллювиирования и лессиважа (сорбционный барьер в иллювиальном горизонте), за счет высвобождения свободных оксидов и гидрооксидов Fe и Mn («зона ожелезнения» в верхней части почвенного профиля).

Заключение

В результате исследования установлено, что образование системы почвенных соединений микроэлементов в высокогорной зоне луговых ландшафтов Западного Кавказа на территории Архыза происходит под действием основных почвенно-геохимических процессов, свойственных развитым здесь почвам. Накопление большого количества органического вещества в условиях повышенной инсоляции, избыточного увлажнения, невысоких температур способствует преимущественному связыванию микроэлементов с органоминеральными комплексами. Процессы внутрипочвенного выветривания приводят к высвобождению свободных оксидов и гидрооксидов Fe и Mn, накоплению в составе илистой фракции почв большого количества гидрослюд. Эти соединения также являются фазами-носителями микроэлементов в горно-луговых почвах региона. Особенности радиального распределения химических элементов обусловлены действием внутрипочвенных геохимических барьеров (биогеохимического, сорбционного, альфегумусового) в различных частях почвенного профиля. Также значительное влияние оказывает геохимическая специфика почвообразующих отложений, представленных продуктами выветривания кислых пород. Латеральное распределение микроэлементов контролируется процессами перемещения почвенных масс по склонам различной крутизны и характеризуется увеличением концентрации химических элементов в нижних частях крутых склонов, днищах древних цирков. Антропогенное воздействие в высокогорной зоне Архыза, проявляющееся в усиленном изменении травянистого покрова в местах интенсивного выпаса скота на альпийских и субальпийских пастбищах, практически не отражается на микроэлементном составе почв.

Изученные особенности формирования микроэлементного состава высокогорных почв под горно-луговой растительностью Западного Кавказа в районе Архыза служат основой проведения мониторинговых исследований для установления степени их трансформации в условиях усиления антропогенного воздействия на горные экосистемы. Их организация является важным звеном всей системы обеспечения устойчивого развития горных территорий как в нашей стране, так и за рубежом.

Список источников

1. Мотузова Г. В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 168 с.
2. Rezapour S., Golmohammad H. & Ramezanpour H. Impact of parent rock and topography aspect on the distribution of soil trace metals in natural ecosystems // *Journal of Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 11. P. 2075–2086. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0663-3>
3. Дегтярева Т. В., Караев Ю. И., Лиховид А. А., Лысенко А. В. Микроэлементный состав дерново-карбонатных почв Северо-Западного Кавказа // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021. Т. 13. № 1 (47). С. 25–34. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-1-25-34>
4. Вайнгартнер Р., Гуня А. Н. Значение гор и необходимость активного участия в горных программах // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2016. Т. 8. № 2. С. 120–126. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-2-120-126>
5. Шальнев В. А., Юрин Д. В. Архыз. Природные условия и современные ландшафты. Ставрополь: СКФУ, 2016. 112 с.
6. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 238 с.
7. Глазовская М. А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Географический факультет МГУ, 2007. 350 с.
8. Дегтярева Т. В., Лиховид А. А. Особенности микроэлементного состава горных аллювиальных почв Западного Кавказа // *Наука. Инновации. Технологии*. 2024. № 2. С. 9–26. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.2.1>
9. Назаров А. Г. Геохимия высокогорных ландшафтов. М.: Наука, 1974. 168 с.
10. Ромашкевич А. И., Бирин А. Г. Педоморфизм минеральной массы в высокогорных почвах Большого Кавказа // *Почвоведение*. 1986. № 3. С. 106–116.
11. Koons R. D., Helmke P. A., Jackson M. L. Association of trace elements with iron oxides during weathering // *Soil Science Society of America Journal*. 1980. Vol. 44:155–159. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400010032x>
12. Переломов Л. В., Пинский Д. Л. Формы Mn, Pb и Zn в серых лесных почвах Среднерусской возвышенности // *Почвоведение*. 2003. № 6. С. 682–691.

13. Covelo E., Vega F., Andrade M. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components // *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 140. P. 308–315.
14. Юрак В. В., Апакашев Р. А., Валиев Н. Г., Лебзин М. С. Сорбент-ориентированный метод детоксикации почв от тяжелых металлов // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021. Т. 13. № 1 (47). С. 135–145. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-1-135-150>
15. Bradl H. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 277. P. 1–18.
16. Acosta J A, Martínez-Martínez S, Faz A, Arocen J (2011) Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials. *Geoderma* Vol. 161. P. 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.001>
17. Lukman S., Essa M. H., Nuthu D., Mu'azu N., Bukhari A., Basheer C. Adsorption and desorption of heavy metals onto natural clay material: Influence of initial pH // *Journal of Environmental Science and Technology*. 2013. Vol. 6. P. 1–15.
18. Молчанов Э. Н. Горно-луговые почвы высокогорий Западного Кавказа // *Почвоведение*. 2010. № 12. С. 1433–1448.
19. Рыжова И. М., Шамшин А. А. Оценка сопряженности критических переходов в почвенном и растительном покровах в системе высотной поясности // *Почвоведение*. 2001. № 5. С. 522–532.
20. Дьяченко В. В. Геохимия, систематика и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа. Ростов-на-Дону: Комплекс, 2004. 268 с.
21. Понизовский А. А., Мироненко Е. В. Механизмы поглощения свинца (II) почвами // *Почвоведение*. 2001. № 4. С. 418–429.

References

1. Motuzova G V. Microelement compounds in soils: system organization, environmental significance, monitoring. Moscow: Librokom; 2009. 168 p. (In Russ.).
2. Rezapour S, Golmohammad H, Ramezanpour H. Impact of parent rock and topography aspect on the distribution of soil

- trace metals in natural ecosystems. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2014;11:2075-2086. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0663-3>
3. Degtyareva TV, Karaev Yul, Likhovid AA, Lysenko AV. Microelement composition of sod-carbonate soils of the North-Western Caucasus. Sustainable development of mountain territories. 2021;13(1(47)):25-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-1-25-34>
 4. Vaingartner R, Gunya AN. The meaning of the mountains and the need for active participation in mountain programs. Sustainable development of mountain territories. 2016;8(2):120-126. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-2-120-126>
 5. Shalnev VA, Yurin DV, Arkhyz. Natural conditions and modern landscapes. Stavropol: SKFU; 2016. 112 p. (In Russ.).
 6. Vinogradov AP. Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils. M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1957. 238 p. (In Russ.).
 7. Glazovskaya MA. Geochemistry of natural and technogenic landscapes. M.: Faculty of Geography of Moscow State University; 2007. 350 p. (In Russ.).
 8. Degtyareva TV, Likhovid AA. Features of the microelement composition of mountain alluvial soils of the Western Caucasus. *Science. Innovations. Technologies*. 2024;(2):9-26. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.2.1> (In Russ.).
 9. Nazarov AG. Geochemistry of highland landscapes. M.: Science; 1974. 168 p. (In Russ.).
 10. Romashkevich AI, Birina AG. Pedomorphism of mineral mass in the high-mountain soils of the Greater Caucasus. *Eurasian Soil Science*. 1986;3:106-116.
 11. Koons RD, Helmke PA, Jackson ML. Association of Trace Elements with Iron Oxides During Weathering. *Soil Science Society of America Journal*. 1980;44:155-159. <https://doi.org/10.2136/ssa1980.03615995004400010032x>
 12. Perelomov LV, Pinin DL. Forms Mn, Pb and Zn in gray forest soils of the Central Russian Upland. *Eurasian Soil Science*. 2003;(6):682-691. (In Russ.).
 13. Covelo E, Vega F, Andrade M. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;140:308-315.

14. Yurak VV, Apakashev RA, Valiev NG, Lebzin MS. Sorbent-based method of soils detoxification from heavy metals. Sustainable development of mountain territories. 2021;13(1(47)):135-145. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-1-135-150>
15. Bradl H. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. Journal of Colloid and Interface Science. 2004;277:1-18.
16. Acosta JA, Martínez-Martínez S, Faz A, Aroca J. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials. Geoderma. 2011;161:30-42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.001>
17. Lukman S, Essa MH, Nuthu D, Mu'azu N, Bukhari A, Bashir C. Adsorption and desorption of heavy metals onto natural clay material: Influence of initial pH. Journal of Environmental Science and Technology. 2013;6:1-15.
18. Molchanov EN. Mountain-meadow of the highlands of the Western Caucasus. Soil Science. 2010;12:1433-1448. (In Russ.).
19. Ryzhova IM, Shamshin AA. Assessment of the conjugation of critical transitions in soil and plant cover in the altitudinal pronounced system. Eurasian Soil Science. 2001;5:522-532. (In Russ.).
20. Dyachenko VV. Geochemistry, systematics and assessment of the state of landscapes of the North Caucasus. Rostov-on-Don: Complex; 2004. 268 p. (In Russ.).
21. Ponizovsky AA, Mironenko EV. Mechanisms of the absorption of lead (II) soils. Eurasian Soil Science. 2001;4:418-429. (In Russ.).

Информация об авторах

Татьяна Васильевна Дегтярева – кандидат географических наук, доцент, доцент департамента географии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57196119839, Researcher ID: KLE-1800-2024

Андрей Александрович Лиховид – доктор географических наук, профессор, декан медико-биологического факультета, первый проректор Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57200209407

Вклад авторов

Татьяна Васильевна Дегтярева. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

Лиховид Андрей Александрович. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Information about the authors

Tatyana V. Degtyareva – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Chair of the Department of Geography and Geoinformatics, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57196119839, Researcher ID: KLE-1800-2024

Andrey A. Likhovid – Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Dean of the Faculty of Medicine and Biology, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57200209407

Contribution of the authors

Tatyana V. Degtyareva. Conducting research – data collection, analysis and interpretation. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.

Andrey A. Likhovid. Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.