

Содержание хрома в почвах и биологических объектах лесных экосистем Приволжской возвышенности

К. А. Дурягина¹, А. И. Иванов^{2*}, Д. Г. Смирнов^{3*}

¹Федеральное управление по безопасному хранению и уничтожению химического оружия, Москва, Россия;

²Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия;

³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия.

* Эл. почта: rcgekim@mail.ru, eptesicus@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.07.2024; принята к печати 06.11.2024

В условиях Приволжской возвышенности определено содержание хрома в серых лесных почвах, находящихся под лесной растительностью. Показано, что среднее содержание Cr в изученных почвах составляет 8,16 мг/кг. Это в 8,6 раза меньше кларка Cr в почвах мира. Низкое содержание Cr в изученных разновидностях серых лесных почв связано с тем, что они формируются на осадочных породах, бедных по Cr. Содержание Cr во всех отобранных пробах почвы находится в узком диапазоне от 7,2 до 11,8 мг/кг. Содержание подвижных форм хрома в почвах показало тесную их связь с валовым содержанием Cr. Во всех изученных пробах подвижные формы составляли 1,2–1,5% от валовых концентраций. Изученные представители различных систематических групп живых организмов существенно отличаются друг от друга по содержанию Cr. Средняя концентрация Cr (мг/кг) в плодовых телах грибов, относящихся к классу Agaricomycetes, составила 0,82, в слоевищах лишайников – 0,34, в талломах мхов – 0,52. Корреляция между концентрациями Cr в питающих субстратах и плодовых телах грибов не наблюдается. Среднее содержание Cr в вегетативных органах сосудистых растений составило 0,50 мг/кг. Минимальное содержание выявлено у кустарников, немного выше оно у деревьев, а максимальное у трав. Полученные величины соответствуют средним показателям для экологически чистых территорий страны.

Ключевые слова: лесные экосистемы, биологические объекты, почва, токсичные элементы.

Content of chrome in soils and biological objects of Volga highlands forest ecosystems

K.A. Duriagina¹, A.I. Ivanov^{2*}, D.G. Smirnov^{3*}

¹Federal Agency for Safe Storage and Elimination of Chemical Weapon, Moscow, Russia;

²Penza State Agrarian University, Penza, Russia;

³Penza State University, Penza, Russia.

*E-mail: rcgekim@mail.ru, eptesicus@mail.ru

Chromium content in gray forest soils under forest vegetation was determined in Volga Upland. The average content of Cr in the soils studied is 8.16 mg/kg. This is 8.6 times less than the Clarke number of Cr in most soils of the world. Cr content in the varieties of gray forest soils studied is low due to that the soils are formed on sedimentary rocks, which are poor in this element. Cr content in all soil samples is similar: it ranges from 7.2 to 11.8 mg/kg. The content of the mobile forms of chromium in soils closely correlates with the gross Cr content. In all samples studied, the contents of the mobile forms amounted to 1.2-1.5% of the gross concentrations. Different systematic groups of living organisms significantly differ from each other in Cr content. The average content of Cr (mg/kg) is 0.82 in the fruiting bodies of Agaricomycetes mushrooms, 0.34 in lichen layers, and 0.52 in moss thalloms. No correlation between Cr concentrations in feeding substrates and fruiting bodies of fungi was observed. The average Cr content in the vegetative organs of vascular plants is 0.50 mg/kg. Cr content is minimum in shrubs, slightly higher in trees, and maximum in grasses. These values correspond to the average values for ecologically clean areas in Russia.

Keywords: forest ecosystems, biological objects, soil, toxic elements.

Введение

Хром – жизненно важный химический элемент. Его соединения являются постоянной составной частью живых клеток [3]. Однако в превышающих потребность живых организмов количествах Cr, как и другие тяжелые металлы, проявляет острую токсичность [12, 13, 16]. Биогеохимический цикл хрома при сравнении с другими токсичными химическими элементами изучен значительно слабее. Причиной этого является сильная вариабельность содержания Cr в почвах и подстилающих породах в разных регионах и геохимических провинциях [2]. В связи с этим, для понимания общих закономерностей биогеохимического цикла элемента особое значение имеют исследования в тех регионах, где содержание хрома в объектах окружающей среды до настоящего времени не изучено. Содержание Cr в почвах и биологических объектах лесных экосистем Приволжской возвышенности в пределах Пензенской области ранее не изучалось. Этим определяется научная новизна выбранного направления исследований.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в восточной части Пензенской области Российской Федерации (рис. 1), на территории которой представлен весь спектр разновидностей серых лесных почв, а биологическое разнообразие, свойственное лесным экосистемам Приволжской возвышенности, максимальное [5]. Объектами исследований

являлись лесные экосистемы. Содержание Cr определяли в почвах, находящихся под лесной растительностью, в плодовых телах грибов класса агарикомицетов (*Agaricomycetes*), в слоевищах лишайников, в талломах мхов и в вегетативных органах сосудистых растений, относящихся к различным жизненным формам. В связи с тем, что в районе исследований нет предприятий металлургической и химической промышленности, а также объектов энергетики, работающих на твердом топливе, он может быть охарактеризован как территория, на которой отсутствуют источники выбросов, содержащих хром. Исследования проводили с сентября 2016 по май 2020 года.

Отбор проб почв осуществлялся по ГОСТ 17.4.3.01-83. Для отбора проб каждой почвенной разновидности было использовано не менее трех площадок размером 5 на 5 м, на которых методом конверта отбирались пробы из каждого почвенного горизонта на всю глубину почвенного профиля.

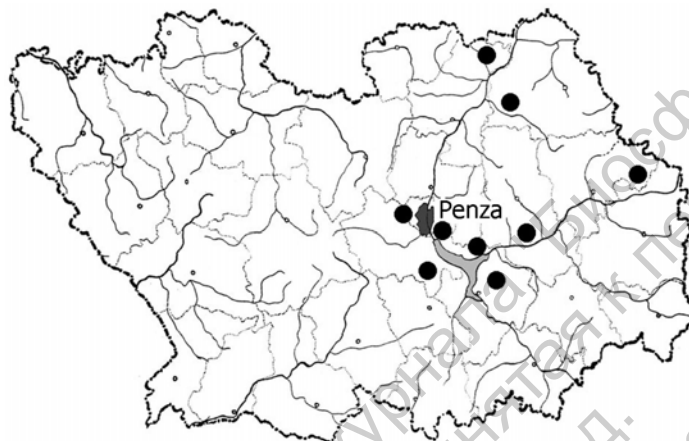


Рис. 1. Места отбора проб почвы и биоматериала

Пробы биоматериала растений и грибов отбирались в соответствии с Методическими указаниями по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и в продукции растениеводства [10] и ГОСТ 27262-87. Под пологом леса закладывали по 10 учетных площадок размером 1 м², располагая по диагонали исследуемой территории. Травостой скашивали на высоте 3–5 см и собирали. Затем разбирали по видам. Отобранные точечные пробы зеленой массы каждого вида раскладывали на полиэтиленовой пленке, тщательно перемешивали и получали объединенную пробу. Из объединенной пробы выбирали среднюю пробу для анализа. Для составления средней пробы брали точечные пробы весом 150–200 г. Вес средней пробы до сушки составлял 1,5–2 кг. Этим же принципам следовали при отборе проб листьев и других органов древесных растений. Пробы корки и древесины отбирались из нижней комлевой части стволов на высоте 1,2–1,5 м деревьев среднего возраста (50–70 лет). Для изучения содержания хрома в корнях использовались окончания корней диаметром не более 1 см.

Пробы плодовых тел грибов, лишайников и мхов, отбирали не менее чем на трех разных участках. Затем формировали объединенную пробу и среднюю пробу для анализа.

Анализ образцов почв и биоматериала, проводили на атомно-адсорбционном спектрометре МГА-915 МД. Лабораторные исследования осуществляли на базе аккредитованной научно-исследовательской лаборатории филиала ФБУ «Федеральное управление по безопасному хранению и уничтожению химического оружия при Министерстве промышленности и торговли РФ (войсковая часть 70855) – 1206 объект по хранению и уничтожению химического оружия (войсковая часть 21222).

Для сравнительной оценки описания данных по накоплению Cr в исследуемых объектах проводили вычисления значений медианы (Me), процентилей (25, 75%) и показателей Min–Max.

Для выявления различий применяли дисперсионный анализ (ANOVA). Апостериорные множественные сравнения проводили с помощью параметрического критерия статистически значимой разности Тьюки (Tukey's HSD test) и непараметрического критерия Краскела – Уоллиса (KW-H). Для возможности применения критерия Тьюки проводили проверку данных на однородность групповых дисперсий с помощью индекса Левинса. Критерий Тьюки считался применимым, если групповые дисперсии были однородны. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Для установления уровня сходства между разными типами почв применяли иерархический кластерный анализ с использованием алгоритма невзвешенного попарного сравнения на основе арифметического среднего (UPGMA) и дистанции Эвклида.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли с использованием программы Microsoft Excel и при помощи статистического пакета Past 3 [18].

Результаты и обсуждение

Среднее содержание Cr в изученных почвах составляет 8,16 мг/кг. Эта величина в 8,6 раза меньше кларка рассматриваемого элемента в почвах мира [7] и в 8,2 раза меньше, чем в почвах Московской обл. [2], в 4,2 раза

меньше, чем в почвах Республики Беларусь [12] и значительно меньше, чем в почвах урбанизированных территорий, испытывающих локальное загрязнение [15]. Низкое содержание Cr в изученных нами разновидностях серых лесных почв связано с тем, что они формируются исключительно на осадочных породах – песках, песчаниках и бескарбонатных глинах, которые бедны рассматриваемым элементом [6]. Содержание Cr во всех отобранных пробах почвы близкое и находится в диапазоне от 7,2 до 11,8 мг/кг.

По валовому содержанию Cr разновидности серых лесных почв четко дифференцируются на две группы. В первую входят бедные хромом почвенные разновидности песчаного и супесчаного гранулометрического состава, во вторую – относительно богатые хромом суглинистые и глинистые почвы (рис. 2). Отмеченная закономерность связана с тем, что суглинистые почвы обладают более высокой способностью поглощать и удерживать анионы и катионы, а так же более высоким содержанием микроэлементов в глинистых породах, чем в песках [9].

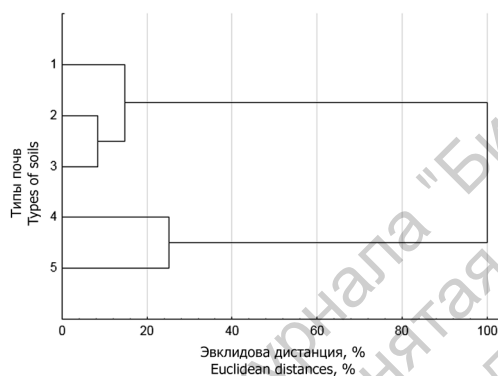


Рис. 2. Дендрограмма сходства разновидностей серых лесных почв по содержанию хрома: 1 – светло-серая лесная супесчаная среднемощная; 2 – светло-серая лесная супесчаная маломощная; 3 – светло-серая лесная песчаная маломощная; 4 – серая лесная легкосуглинистая среднемощная; 5 – серая лесная тяжелосуглинистая среднемощная ($R_{coph} = 0,98$)

Содержание подвижных форм хрома тесно связано с его валовым содержанием. Во всех изученных пробах подвижные формы составляли 1,2–1,5% от валовых концентраций, что значительно ниже величины ПДК, которая согласно ГН 2.1.7.2041-06 составляет 6 мг/кг.

Изученные представители различных систематических групп живых организмов существенно различаются по содержанию Cr. Его наибольшие концентрации и максимальный размах медианных показателей были найдены у агарикомицетов. Сосудистые растения несколько уступали им в этом отношении. Относительно высоким было содержание хрома в талломах мхов. Слоевища лишайников содержали хром в наименьших концентрациях (рис. 3).

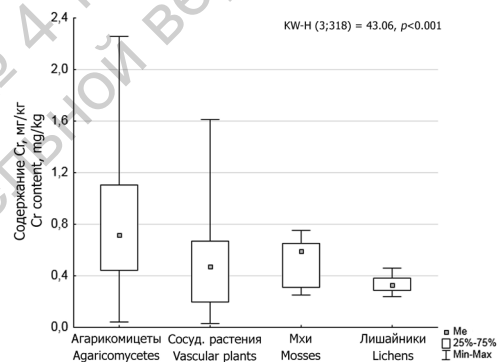


Рис. 3. Диаграмма размаха изменчивости значений содержания хрома (медиана, квантили и min–max) в биоматериале различных групп живых организмов и тест Краскела–Уолиса (KW-H) на различие между значениями медиан

Поступление тяжелых металлов из почвы в биологические объекты в лесных экосистемах теснейшим образом связано с жизнедеятельностью грибов, относящихся в классу агарикомицетов [20]. Было установлено, что средняя концентрация хрома в их плодовых телах в районе исследований составляет 0,82 мг/кг сухого вещества. Полученная величина сопоставима с данными других исследователей. Так, для причерноморских районов Турции она составляет 0,38 мг/кг [19], для Калининградской области – 1,7 мг/кг [10].

По своей функциональной роли в лесных экосистемах агарикомицеты подразделяют на ряд эколого-трофических групп [7]. Для изучения особенностей накопления Cr их представителями было взято по двадцать наиболее распространенных видов ксилотрофов, напочвенных сапротрофов и симбиотрофов [7].

В целом, между тремя рассмотренными эколого-трофическими группами агарикомицетов по медианным показателям статистические различия не выявлены (рис. 4). Однако в накоплении Cr отдельными видами статистически достоверные отличия определены.

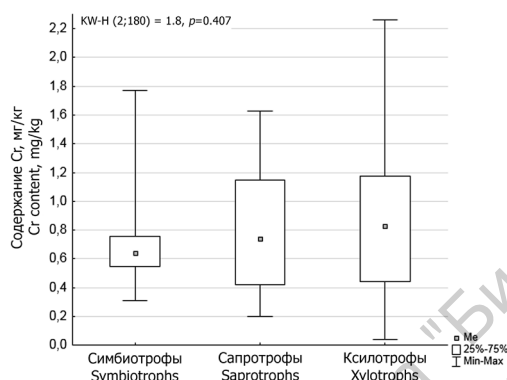


Рис. 4. Содержание хрома (медиана, квартили и min-max) в плодовых телах грибов различных трофических групп (мг/кг) и тест Краскела-Уолиса (KW-H) на различие между значениями медиан

Среди изученных видов агарикомицетов максимальные концентрации Cr в плодовых телах были определены у *Schizophyllum commune* (2,23 мг/кг), *Amanita phalloides* (1,74 мг/кг), *Agrocybe praecox* (1,60 мг/кг), и *Amanita pantherina* (1,38 мг/кг).

Корреляция между концентрациями Cr в питающих субстратах и плодовых телах агарикомицетов не наблюдается. Это связано с тем, что накопление Cr в плодовых телах имеет видовую специфичность и зависит от неодинаковой потребности различных видов грибов в этом элементе [5].

Содержание хрома нами изучалось также в талломах лишенизированных грибов, объединяемых обычно под общим названием лишайники. Для исследований были взяты два наиболее распространенных вида эпифитов: *Hypogymnia physodes* и *Parmelia sulcata*, а также эпигейный лишайник *Cladonia sylvatica*. Последний вид обычно доминирует в напочвенном покрове лишайниковых сосняков рассматриваемого региона. Максимальная концентрация была определена для эпифитного вида *Hypogymnia physodes* (0,42 мг/кг), который обладает повышенной сорбционной способностью и используется в качестве биоиндикатора загрязнения атмосферного воздуха [16]. Содержание рассматриваемого элемента в талломах других изученных видов выражалось близкими значениями и составляло для *Parmelia sulcata* 0,31 мг/кг, а для *Cladonia sylvatica* 0,29 мг/кг. Среднее содержание хрома в слоевищах изученных видов лишайников в районе исследований составило 0,34 мг/кг. Как показывает анализ литературных источников, содержание этого элемента в слоевищах лишайников варьирует в очень широких пределах – от 0,12 до 2,65 мг/кг, а в условиях локального загрязнения может достигать 5–10 мг/кг [16]. В связи с тем, что в районе исследований отсутствуют локальные источники выбросов, содержащих хром, полученные в результате измерений значения соответствуют средним показателям для экологически чистых территорий страны.

Мхи, как и лишайники, не имеют корней и получают различные химические элементы главным образом из атмосферных выпадений. В связи с этим их содержание, как и в лишайниках, сильно варьирует. В районах, где воздух загрязнен тяжелыми металлами, их содержание в мхах может быть очень высоким [1]. Однако о фоновом содержании хрома в талломах мхов в экосистемах, не испытывающих локального загрязнения, информация практически отсутствует. Содержание хрома нами изучалось в талломах листовых зеленых мхов. Для исследований были взяты два наиболее распространенных вида эпигейных мхов: *Dicranum polysetum* и *Pleurozium schreberi*, а также эпифит *Stereodon pallescens*. Последний вид обычно доминирует среди мхов, обитающих на стволах большинства видов деревьев в лесах района исследований. Максимальная концентрация была определена для эпифитного вида *Stereodon pallescens* (0,68 мг/кг), который обладает повышенной сорбционной способностью по отношению к тяжелым металлам и может быть использован в качестве биоиндикатора загрязнения атмосферного воздуха [4]. Содержание рассматриваемого элемента в талломах других изученных видов выражалось близкими значениями и составляло для *Dicranum polysetum* 0,42 мг/кг, а для *Pleurozium schreberi* 0,46 мг/кг. Среднее содержание хрома в слоевищах изученных видов мхов в районе исследований составило 0,52 мг/кг.

В результате изучения содержание хрома в вегетативных и репродуктивных органах растений различных жизненных форм – деревьев, кустарников и многолетних трав – установлено, что наиболее активно хром в вегетативных органах накапливают травы (62 мг/кг). Среднее содержание хрома в вегетативных органах деревьев

и кустарников было одинаковым – 0,46 мг/кг и 0,42 мг/кг соответственно ($p > 0,05$). Однако деревьям свойственен больший диапазон изменчивости медианных показателей (рис. 5).

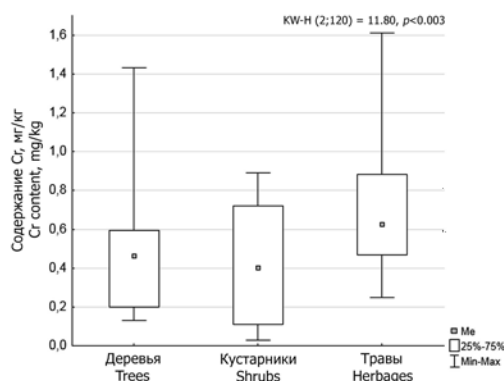


Рис. 5. Содержание хрома в вегетативных органах сосудистых растений различных жизненных форм и тест Краскела–Уолиса (KW-H) на различие между значениями медиан

Изучение закономерностей накопления хрома наиболее распространенными видами травянистых растений, растущих под пологом леса – *Aegopodium podagraria*, *Anemone ranunculoides*, *Carex pilosa*, *Stellaria holostea* – показало, что эти виды трав накапливают хром до разных концентраций (рис. 6). Различия между значениями содержания хрома в вегетативных органах разных видов оказались статистически значимыми. Наименьшие значения определены для *A. ranunculoides* (0,26 мг/кг) средние – для *S. holostea* (0,62 мг/кг) и *A. podagraria* (0,82 мг/кг), а максимальные – для *C. pilosa* (1,01 мг/кг). Максимальный показатель превышал минимальный в 3,9 раза. У всех изученных видов в листьях содержание хрома было выше, чем в корневищах. В цветках хром содержался в 1,5 раза меньшем количестве, чем в вегетативных органах.

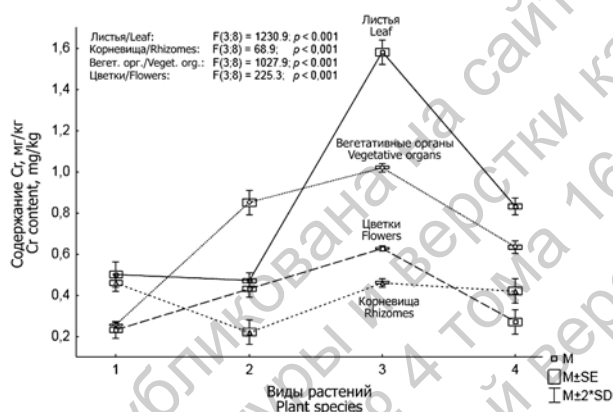


Рис. 6. Диаграмма размаха изменчивости значений содержание хрома в вегетативных органах и цветках травянистых растений: 1 – *Aegopodium podagraria*, 2 – *Anemone ranunculoides*, 3 – *Carex pilosa*, 4 – *Stellaria holostea* и результаты дисперсионного анализа.

В накоплении хрома древесными растениями также наблюдалась видовая специфичность. По содержанию рассматриваемого элемента в вегетативных органах (мг/кг), деревья распределились в следующей последовательности: дуб *Quercus robur* – 0,62, береза *Betula pendula* – 0,47, липа *Tilia cordata* – 0,34, сосна *Pinus sylvestris* – 0,32.

Содержание хрома в различных тканях и органах деревьев не одинаково. Для всех изученных видов наблюдается одна и та же закономерность. Имеющиеся различия статистически достоверны. Минимальные значения были определены для коры, максимальные – для хвои и листьев. Корневая система и древесина ствола заняли по этому показателю среднее положение (рис. 7).

Содержание хрома в репродуктивных органах деревьев в 1,7 раза меньше, чем в вегетативных органах. Его содержание в плодах несколько ниже, чем в цветках. Различия статистически значимы (рис. 8).

Различные виды деревьев накапливают хром в репродуктивных органах не одинаково (рис. 8). Его аккумуляции в цветках и плодах коррелирует с таковой в вегетативных органах. Максимальные концентрации рассматриваемого элемента, как в вегетативных, так и в репродуктивных органах были определены у *Q. robur*, минимальные – у *T. cordata*.

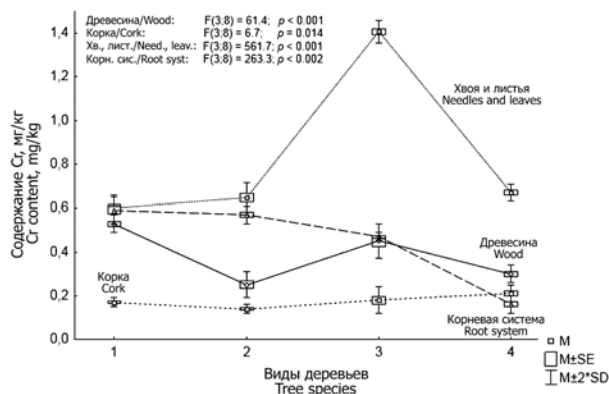


Рис. 7. Диаграмма размаха изменчивости значений содержания кадмия в органах и тканях деревьев: 1 – *Betula pendula*, 2 – *Quercus robur*, 3 – *Pinus sylvestris*, 4 – *Tilia cordata* и результаты дисперсионного анализа

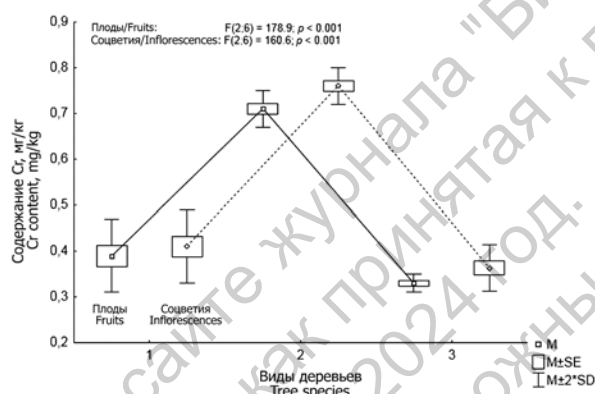


Рис. 8. Диаграмма размаха изменчивости значений содержания хрома в репродуктивных органах деревьев: 1 – *Betula pendula*, 2 – *Quercus robur*, 3 – *Tilia cordata* и результаты дисперсионного анализа.

Результаты измерения содержания хрома в вегетативных и репродуктивных органах кустарников, наиболее распространенных в районе исследований, показали, что его среднее содержание в вегетативных органах составляло 0,42 мг/кг.

Разные виды кустарников накапливают хром не одинаково, хотя и до близких уровней в вегетативных органах (рис. 9). Наибольшая концентрация была определена у *C. avellana* (0,43 мг/кг), у *L. xylosteum* (42 мг/кг) и *E. verrucosus* (0,40 мг/кг) она была несколько ниже.

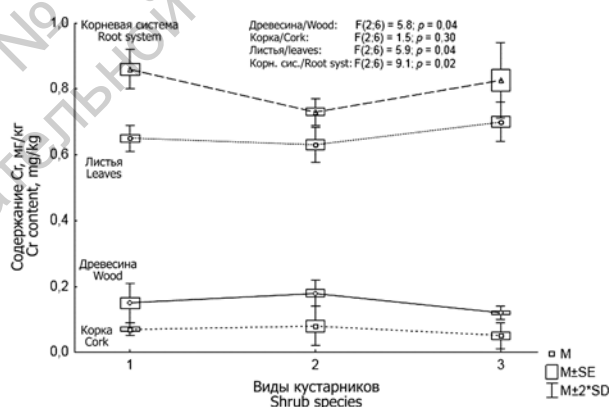


Рис. 9. Диаграмма размаха изменчивости значений содержание хрома в вегетативных органах и тканях кустарников: 1 – *Corylus avellana*, 2 – *Euonymus verrucosus*, 3 – *Lonicera xylosteum* и результаты дисперсионного анализа.

Содержание хрома в репродуктивных органах кустарников, в отличие от деревьев, было несколько выше, чем в вегетативных, и превышало таковое у деревьев в 1,3 раза. Содержание рассматриваемого элемента в плодах растений данной жизненной формы было несколько выше, чем в цветках (рис. 10).

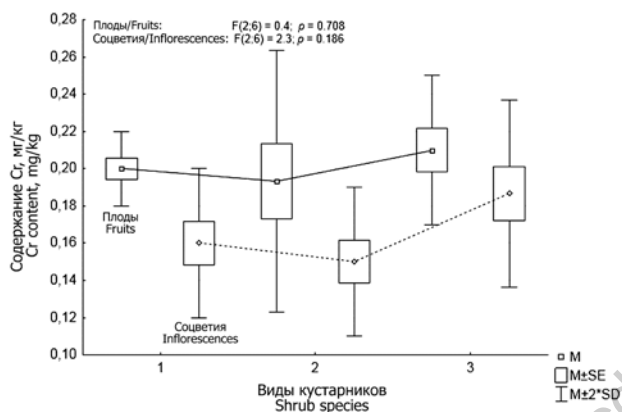


Рис. 10. Диаграмма размаха изменчивости значений содержание хрома в репродуктивных органах кустарников: 1 – *Corylus avellana*, 2 – *Euonymus verrucosus*, 3 – *Lonicera xylosteum* и результаты дисперсионного анализа.

Заключение

Важной региональной особенностью лесных экосистем района исследований является низкое содержание Cr в формирующихся под ними почвах, которое составляет 8,16 мг/кг. Эта величина в 8,6 раза меньше кларка рассматриваемого элемента в почвах мира. Первая причина этого – наследование микроэлементного состава почвами от геологических и почвообразующих пород, которые в условиях Приволжской возвышенности бедны хромом. Вторая причина – отсутствие промышленных объектов, выбросы которых могут вызывать антропогенное загрязнение окружающей среды хромом. Невысокое среднее содержание Cr было зафиксировано и в биологических объектах. Так, в плодовых телах агарикомицетов оно составило (мг на кг сухого вещества) 0,82 мг/кг, в слоевищах лишайников 0,34, в талломах мхов 0,52, в вегетативных органах сосудистых растений 0,50. Сравнение полученных данных с опубликованными результатами измерений других исследователей показало, что содержание хрома в биологических объектах района исследований находится на уровне минимальных и средних показателей, определенных для других районов планеты.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Боброва АВ, Васильев АА. Тяжелые металлы в почвах и мхах-эпифитах Ленинского района г. Ижевск АгроЭкоИнфо Электронный научно-производственный журнал. 2021;(4):1-2.
2. Волгин ДА. Фоновый уровень и содержание тяжелых металлов в почвенном покрове Московской области. Вестник Московского государственного областного университета. 2011;(1):26-33.
3. Ермаков ВВ, Тютиков СФ. Геохимическая экология животных. М: Наука; 2008.
4. Иванов АИ. Использование организмов различных таксономических групп для мониторинга окружающей среды. Теоретическая и прикладная экология. 2007;(2):72-8.
5. Иванов АИ, Горохова АГ, Андреева МИ, Дурягина КА. Биологическая аккумуляция химических элементов грибами агарикомицетами (Agaricomycetes) в условиях Приволжской возвышенности. Теоретическая и прикладная экология. 2020;(2):39-44.
6. Иванов АИ, Чернышов НВ, Кузин ЕН. Природные условия Пензенской области. Современное состояние. Т. 1. Геологическая среда, рельеф, климат, поверхностные воды, почвы, растительный покров. Пенза: РИО-ПГСХА; 2017.
7. Кабата-Пендиас А, Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир; 1989.
8. Коваленко АЕ. Экологический обзор грибов из порядков Polyporales s. str., Boletales, Agaricales s. str., Russulales в горных лесах центральной части Северо-Западного Кавказа. Микология и фитопатология. 1980;14(4):300-14.
9. Ковда ВА. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука; 1985.
10. Королева ЮВ, Охрименко МА. Особенности накопления тяжелых металлов лесными грибами Калининградской области. Вестник балтийского университета им. И. Канта. 2015;(1):106-17.
11. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. ЦИНАО; 1992.
12. Скугорева СГ, Ашихмина ТЯ, Фокина АИ, Лялина ЕИ. Токсичность тяжелых металлов для растений ячменя, почвенной и ризосферной микрофлоры. Теоретическая и прикладная экология. 2016;(2):32-45.
13. Толкач ГВ, Позняк СС. Содержание химических элементов в почвах на территории фермерских (крестьянских) хозяйств Брестского района. Экологический вестник. 2015;3(33):79-88.
14. Трифонова ТА, Салмин АС. Использование лишайника *Hypogymnia physodes* в качестве аккумулятивного биоиндикатора техногенного загрязнения атмосферы. Юг России: экология, развитие. 2019;(14):152-63.

15. Трифонова ТА., Курочкин ИН, Курбатов ЮН. Тяжелые металлы в почвах различных зон урбанизированных территорий: оценка содержания и экологического риска. Теоретическая и прикладная экология. 2023;(2)38-42.
16. Черных НА, Милащенко НЗ, Ладонин ВФ. Экоотоксикологические аспекты загрязнения тяжелыми металлами. М.: Агропромиздат; 1999.
17. Шевченко ВП, Стародымова ДП, Афанасьева АА, Бычкова АВ, Конева ВВ, Саввичев АС. Особенности накопления тяжелых металлов кустистыми эпифитными лишайниками в республиках Алтай и Хакассия. Биологические науки, Фундаментальные исследования. 2014;(12):2373-7.

Общий список литературы / References

1. Bobrova AV, Vasilyev AA. [Heavy metals in soils and epiphyte mosses of the Leninsky district of Izhevsk]. AgroEkoInfo Ehlektronnyi Nauchno-Proizvodstvennyi Zhurnal. 2021;(4)1. (in Russ.).
2. Volgin DA. [Background level and content of heavy metals in the soil cover of Moscow region]. Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Oblastnogo Universiteta". 2011;(1):26-33. (In Russ.)
3. Yermakov VV, Tiutikov SF. Geokhimicheskaya Ekologiya Zhivotnykh [Geochemical Ecology of Animals]. Moscow: Nauka; 2008. (In Russ.).
4. Ivanov A.I. [The use of organisms of various taxonomic groups for environmental monitoring]. Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya. 2007;(2):72-8
5. Ivanov AI, Gorokhova AG, Andreyeva MI, Duriagina KA. [Biological accumulation of chemical elements by agaricomycetes (Agaricomycetes) fungi in conditions of the Volga Upland]. Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya 2020;(2):39-44 (In Russ.). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-064-069.
6. Ivanov AI, Chernyshov NV, Kuzin EN. Prirodnye Usloviya Penzenskoy Oblasti [Natural Conditions of Penza Oblast. Modern State. Vol. 1. Geological Environment, Relief, Climate, Surface Waters, Soils, Vegetation Cover]. Penza: RIO-PGSKHA; 2017. (In Russ.). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-006-000
7. Cabata-Pendias A, Pendias H. [Micronutrients in Soils and Plants]. Moscow: Mir; 1989 (In Russ.).
8. Kovalenko AYe. [Ecological review of fungi from the orders Polyporales s. str., Boletales, Agaricales s. str., Russulales in the mountain forests of the central part of the Northwestern Caucasus]. Mikologiya i Fitopatologiya. 1980;14(4):300-14 (in Russ.).
9. Kovda VA. Biogeokhimiya Pochevennogo Pokrova [Biogeochemistry of Soil Cover]. Moscow: Nauka; 1985. (in Russ.).
10. Korolenko YuV, Okhrimenko MA. [Peculiarities of heavy metal accumulation by forest mushrooms of the Kaliningrad Region]. Vestnik Baltiyskogo Universiteta im. I. Kanta. 2015;1:106-7 (in Russ.).
11. Metodicheskiye ukazaniya po Opredeleniyu Tiyazhelykh Metallov v Pochvakh Selkhozugodiy i Produktsii Rasteniyevodstva [Methodological Guidelines for Heavy Metals Determination in Agricultural Soils and Products]. TsINAO; 1992. (in Russ.).
12. Skugoreva SG, Ashikhmina TY, Fokina AI, Lialina EL. [Heavy metal toxicity for barley plants, soil and rhizosphere microflora]. Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya. 2016;(2):32-45 (in Russ.). doi: 10.25750/1995-4301-2016-2-032-045
13. Tolkach GV, Poznyak SS. [Content of chemical elements in soils on the territory of farms of Brest district]. Ekologicheskij Vestnik. 2015;3(33):79-88. (in Russ.).
14. Trifonova TA, Salmin AS. [The use of *Hypogymnia physodes* lichen as an accumulative bioindicator of anthropogenic atmospheric pollution]. Yug Rossii Ekologiya Razvitiye. 2019;(14)152-163. (in Russ.).
15. Trifonova TA, Kurochkin IN, Kurbatov YuN. [Heavy metals in soils of various zones of urbanized territories: the price of maintenance and environmental risk]. Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya. 2023;(2):38-42. (in Russ.).
16. Chernykh NA, Milashchenko NZ, Ladonin VF. Ekotoksikologicheskiye Aspekty Zagriazneniya Tiazhelymi Metallami [Ecotoxicological Aspects of Pollution by Heavy Metals]. Moscow: Agropromizdat; 1999. (in Russ.).
17. Shevchenko VP, Starodymova DP, Afanasyeva AA, Bychkova AV, Koneva VV, Savvichev AS. [Features of heavy metal accumulation by bush epiphytic lichens in Altai and Khakassia republics]. Biologicheskije Nauki Fundamentalnye Issledovaniya. 2014;(12):2373-7. (in Russ.).
18. Hammer O, Harper DAT, Ryan PD. PAST: Palaeontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontol Electronica. 2001;4(1):4-9.
19. Isidak O, Turkekul I, Elmastas M, Tuzen M. Analysis of heavy metals in some wild-grown edible mushrooms from the middle black sea region. Turkey. Food Chemy. 2004:547-552.
20. Smith S, Read DJ. Mycorrhizal Symbiosis. London, Academic Press; 1997.