

СОДЕРЖАНИЕ КАДМИЯ В ПОЧВЕ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ В УСЛОВИЯХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ В ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

М.И. Андреева¹, А.И. Иванов^{2*}, Д.Г. Смирнов³

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

² Пензенский государственный аграрный университет, Пенза, Россия;

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

* Эл. почта: rcgekim@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.05.2020; принята к печати 18.06.2020

Приведены результаты исследований содержания кадмия в серых лесных почвах, находящихся под лесной растительностью в условиях Приволжской возвышенности в пределах Пензенской области. Даны количественные оценки и накопления кадмия в грибах, сосудистых растениях, мхах, лишайниках и беспозвоночных животных. Проведен анализ особенностей накопления кадмия представителями различных экологических групп и жизненных форм этих организмов. Рассмотрены некоторые стороны влияния использования лесных ресурсов на содержание кадмия в лесных экосистемах.

Ключевые слова: беспозвоночные животные, грибы, кадмий, лишайники и мхи, серые лесные почвы, сосудистые растения, тяжелые металлы.

CADMIUM CONTENT IN SOIL AND BIOLOGICAL OBJECTS UNDER THE CONDITIONS OF FOREST ECOSYSTEMS OF VOLGA UPLAND IN PENZA REGION

M.I. Andreeva¹, A.I. Ivanov^{2*}, D.G. Smirnov³

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

² Penza State Agrarian University, Penza, Russia;

³ Penza State University, Penza, Russia

* E-mail: rcgekim@mail.ru

The article presents the results of research on the content of cadmium in grey forest soils located under forest vegetation in the conditions of the Volga upland within the Penza region. A quantitative assessment of the accumulation of this metal in the organisms of mushroom, vascular plants, mosses, lichens and invertebrates is given. The analysis of features of accumulation of this element by representatives of various ecological groups and life forms of these organisms is carried out. The problem of influence of forest resources use on the content of cadmium in forest ecosystems is considered.

Keywords: cadmium, grey forest soils, fungi, heavy metals, invertebrates, lichens and mosses, vascular plants.

Введение

Одной из важнейших проблем биосферной экологии является изучение биогеохимических циклов химических элементов. Особенно актуально изучение в этом направлении тяжелых металлов, обладающих сильной токсичностью, в частности, кадмия.

Соединения кадмия могут накапливаться в живых организмах практически всех таксономических групп, включая человека. Они оказывают негатив-

ное воздействие на процессы обмена веществ даже в ультрамалых концентрациях. Согласно СанПиН 1.2.2353-08 «Канцерогенные факторы и основные требования к профилактике канцерогенной опасности» кадмий и его соединения признаны одним из важнейших канцерогенных факторов, опасных для здоровья человека.

Осадочные породы, на которых формируются серые лесные почвы в условиях Русской равнины, бед-

ны кадмием. В связи с этим приход рассматриваемого элемента в почвы оказывается тесно связан с содержащими его, в результате антропогенного загрязнения, атмосферными выпадениями. Поэтому максимальные концентрации кадмия обычно фиксируются в верхних горизонтах почв [2, 5, 6, 16].

В результате загрязнения окружающей среды кадмием изменяются его концентрации в природных средах и биологических объектах. Для того чтобы фиксировать подобные изменения, необходимо опираться на фоновые количественные показатели содержания кадмия в окружающей среде, которые в настоящее время определены не для всех регионов России.

Целью настоящей работы было изучение фонового содержания кадмия в почвах и биологических объектах в условиях лесных экосистем Приволжской возвышенности в пределах Пензенской области.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи.

Изучить содержание кадмия в серых лесных почвах, находящихся под лесной растительностью.

Дать количественную оценку содержания кадмия в грибах агарикомицетах, сосудистых растениях, мхах, лишайниках, беспозвоночных животных и изучить особенности накопления рассматриваемого элемента представителями различных экологических групп и жизненных форм этих организмов.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований являлись лесные экосистемы Пензенской области. Содержание кадмия определялось в следующих их компонентах: почве, грибах агарикомицетах, сосудистых растениях, мхах, лишайниках и беспозвоночных животных. Исследования проводились с сентября 2015 по декабрь 2019 года. В качестве района исследований была выбрана восточная часть Пензенской области, на территории которой представлен весь спектр разновидностей серых лесных почв и имеет место максимальное биологическое разнообразие, свойственное лесным экосистемам Приволжской возвышенности.

Климат района исследований умеренно-континентальный с периодически повторяющимися засухами. Средняя температура составляет в июле от 19,0 до 19,5 °С, в январе – от 12,5 до 13,0 °С. Количество осадков в разных районах области составляет от 300 до 650 мм в год. Рельеф на большей части территории равнинный с сильным эрозионным расчленением.

Материнские породы, подстилающие почвы, представлены песками, опоками, бескарбонатными и карбонатными глинами. На них формируются почвы двух подтипов: светло-серые лесные и серые лесные. Первый подтип включает в себя три основных почвенных разновидности: светло-серую лесную среднемощную супесчаную, светло-серую лесную маломощную су-

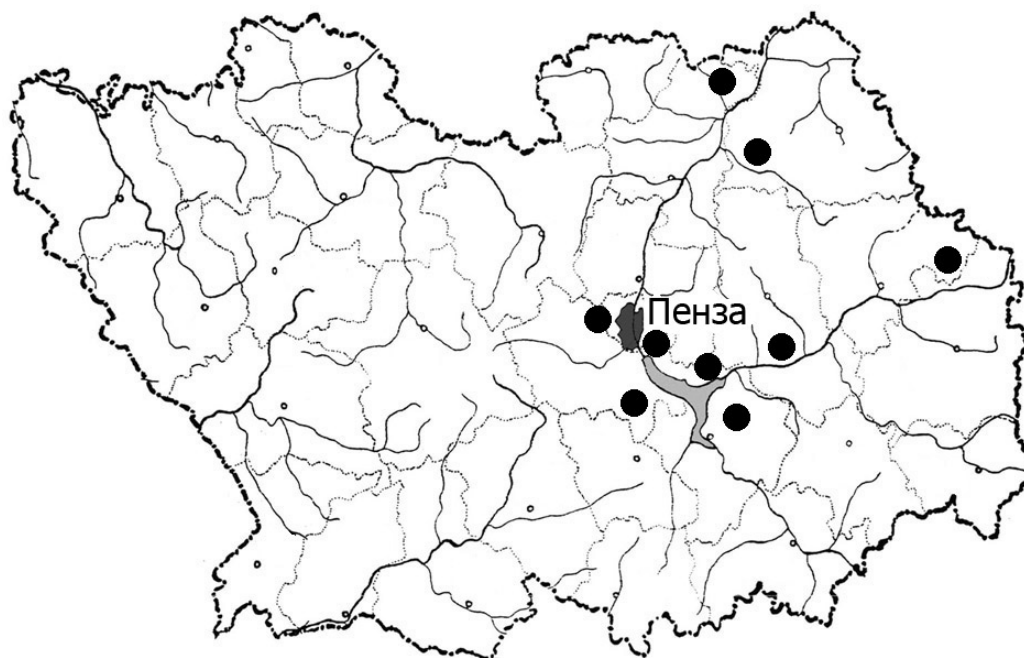


Рис. 1. Места отбора проб почвы и биоматериала в различных районах Пензенской области

песчаную, светло-серую лесную маломощную песчаную; второй – две: серую лесную среднеспособную легко суглинистую и серую лесную тяжело суглинистую среднеспособную. До начала наших исследований содержание кадмия в перечисленных подтипах и разновидностях серых лесных почв, находящихся под лесной растительностью в условиях района исследований, оставалось не изученным.

Растительность имеет типичный лесостепной облик. Леса представлены островными массивами различных размеров, которые окружены сельскохозяйственными угодьями. На светло-серых лесных почвах, подстилаемых опоками и песками, формируются различные типы сосновых лесов: сложные сосняки с липой и дубом, сосняки зеленомошные, лишайниковые и черничные. На темно-серых лесных почвах, подстилаемых бескарбонатными и карбонатными глинами, а также в долинах рек распространены широколиственные леса. На их месте после вырубок как вторичные типы леса формировались березовые и осиновые леса.

Важнейшими лесообразователями в районе исследований являются: береза *Betula pendula* Roth, сосна *Pinus sylvestris* L., дуб *Quercus robur* L., липа *Tilia cordata* Mill. Из кустарников, растущих под пологом леса, наиболее распространены: лещина *Corylus avellana* L., бересклет *Euonymus verrucosus* L., жимолость *Lonicera xylosteum* L. Доминантами травяного покрова в зональных лесных сообществах являются сныть *Aegopodium podagraria* L., ветреница *Anemone ranunculoides* L., звездчатка *Stellaria holostea* L., осока *Carex pilosa* Scop. [10]. Широкое распространение перечисленных видов растений определяет их ведущую роль в биогеохимических циклах химических элементов в лесных экосистемах Пензенской области. О содержании кадмия в биоматериале этих растений до начала наших исследований данные отсутствовали.

Отбор проб почв осуществлялся по ГОСТ 17.4.3.01-83. Пробы биоматериала растений и грибов отбирались в соответствии с Методическими указаниями по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства [12].

Анализ образцов почв и биоматериала выполнялся на атомно-адсорбционном спектрометре МГА-915 МД. Лабораторные исследования осуществляли на базе 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)». Компетентность лаборатории подтверждается аттестатом государственной аккредитации (№ РОСС СОБ 7.00029.2017). Согласно Руководству по эксплуатации абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией, модификация МГА-

915МД, концентрационный предел обнаружения Cd составляет 0,00025 мкг/дм³ ($3 \cdot 10^{-6}$ мг/кг). Эта методика с вероятностью обеспечивает получение результатов анализа с погрешностью, не превышающей $\pm 30\%$.

Для сравнительной оценки данных по накоплению кадмия в биологических объектах и их субстратах проводили вычисления среднеарифметических значений (M), их стандартной ошибки (SE) и стандартного отклонения, или дисперсии (SD). Для выявления особенностей накопления кадмия в пределах жизненных форм и таксономических групп живых организмов выборки разных видов объединяли по их принадлежности к соответствующей группе. Поскольку числовые данные всех исходных выборок были различны, а вновь образующиеся выборочные совокупности оказались неоднородными, то при их описании использовали значения медианы (Me), процентиля (25%, 75%) и показатели Min–Max.

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. В качестве меры репрезентативности, показывающей, насколько точно дендрограмма сохраняет попарные расстояния между исходными не моделированными точками данных, рассчитывали кофенетическую корреляцию (*Rcoph*).

План наших исследований включал сравнения большого числа групп, поэтому был использован однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Исходя из того, что такой анализ позволяет проверить лишь гипотезу о равенстве всех сравниваемых средних, мы для дальнейшего выяснения того, где именно лежат различия, то есть какие именно группы отличаются друг от друга, производили множественное сравнение при использовании параметрического критерия Тьюки (HSD) и непараметрического критерия Краскала-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 ($p > 0,05$).

Во всех случаях уровень различий считали значимым при $p \leq 0,05$. Все расчеты осуществляли в программе Microsoft Excel и при помощи статистического пакета Past 3 [31].

Результаты и обсуждение

Среднее содержание кадмия в изученных серых лесных почвах было низким: 153,0 мкг/кг – в 3,3 раза ниже, чем в среднем по почвам мира, 2,8 раза – чем в западных районах европейской части России, и в 2,5 раза ниже, чем в почвах Семипалатинского При-

иртышья [4, 13, 15]. Главной причиной этого может быть формирование изученных почв на осадочных породах, которые бедны кадмием. Показано, что в песчаных породах содержание кадмия в районе исследований было ниже среднего показателя для песчаников в 1,9 раза, а в бескарбонатных глинах ниже среднего показателя для глин в 7,7 раза [5, 6, 11, 16]. Невысокий естественный фон содержания кадмия в почвах и подстилающих их породах следует считать особенностью геохимии района исследований.

Сравнение средних при использовании критерия статистически значимой разности Тьюки (HSD) выявило отсутствие попарных различий по большинству районов Пензенской области, за исключением Бессоновского и Лунинского. Бессоновский район находится на границе с той частью г. Пензы, где сосредоточены основные промышленные объекты, с подветренной стороны. Кроме того, здесь располагаются городские свалки, на которых периодически возникает возгорание мусора, в том числе резины, пластмасс и других материалов, содержащих кадмий. Лунинский же район среди изученных муниципальных образований области характеризуется минимальной антропогенной нагрузкой.

Анализ образцов, отобранных из горизонтов А различных разновидностей серых лесных почв, показал, что содержание в них кадмия в 4–5 раз ниже установленных ОДК. По валовому содержанию кадмия рассматриваемые почвы различаются. Группу бедных

кадмием образуют относящиеся к подтипу светло-серых лесных почв, включая разновидности песчаного и супесчаного гранулометрического состава. Группу относительно богатых – подтип серых лесных почв, представленных в районе исследований разновидностями суглинистого и тяжело суглинистого гранулометрического состава (рис. 2).

Распределение кадмия по почвенным горизонтам в большинстве изученных разновидностей серых лесных почв имело один и тот же характер (рис. 3). В легких светло-серых лесных почвах наблюдаются два типа распределения кадмия по почвенным горизонтам, которое зависит от мощности горизонта А и содержания гумуса в нем. В светло-серых лесных маломощных песчаных почвах, у которых мощность горизонта А не превышает 5 см, а содержание гумуса менее 1% [9], концентрация кадмия была несколько выше в горизонте В. Это может быть связано с тем, что горизонт А в данной почвенной разновидности обладает очень низкой поглотительной способностью, и кадмий свободно мигрирует вниз по почвенному профилю, задерживаясь за счет фибровых прослоек глины в горизонте В. В светло-серых лесных маломощных и среднемощных почвах мощность горизонта А составляет 8–15 см, а содержание гумуса – 1,0–1,5%. Максимальное содержание кадмия в них наблюдается в горизонте А. Такой же тип распределения рассматриваемого элемента характерен для суглинистых и глинистых серых лесных почв.

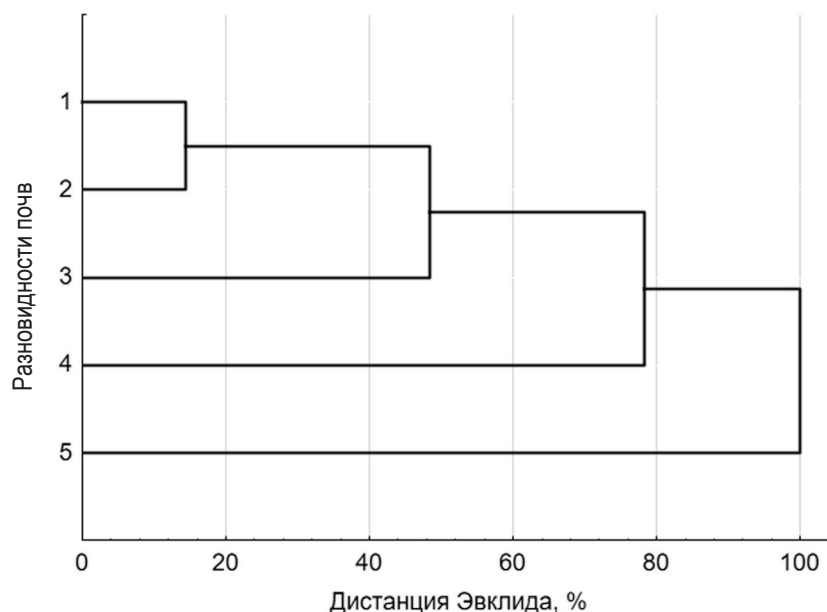


Рис. 2. Дендрограмма сходства подтипов и разновидностей серых лесных почв по содержанию кадмия с учетом разных горизонтов: 1 – светло-серая лесная среднемощная супесчаная; 2 – светло-серая лесная маломощная супесчаная; 3 – светло-серая лесная маломощная песчаная; 4 – серая лесная легко среднемощная суглинистая; 5 – серая лесная среднемощная тяжело суглинистая ($R_{сopn} = 0,81$)

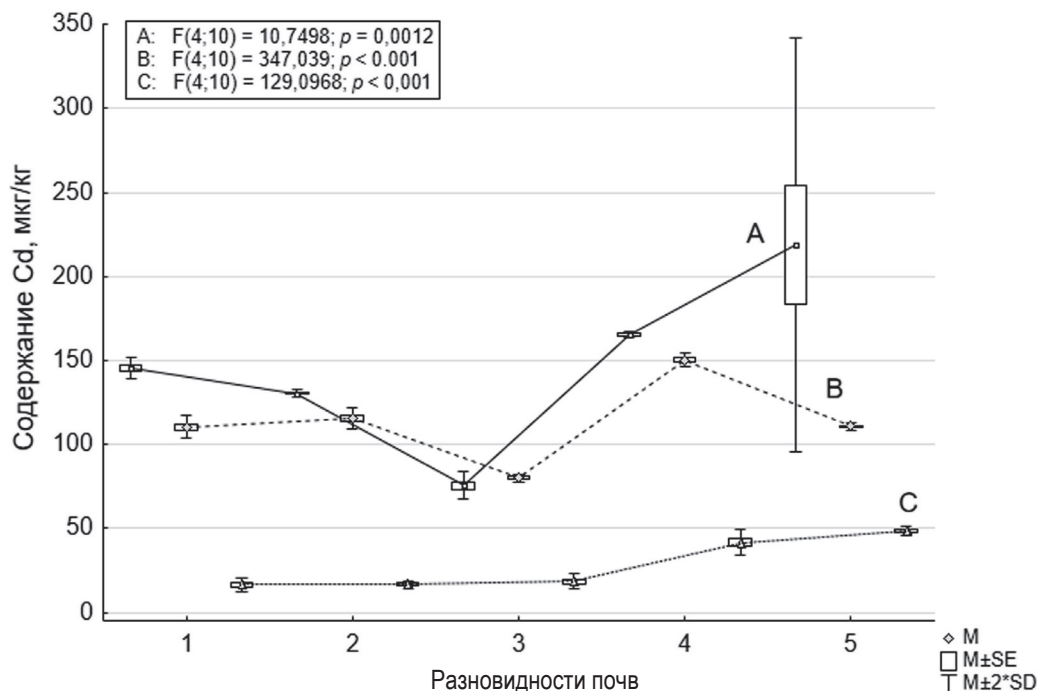


Рис. 3. Диаграмма размаха изменчивости содержания кадмия в различных разновидностях серых лесных почв (1–5) по почвенным горизонтам (А, В, С) и результаты общего дисперсионного анализа: 1 – светло-серая лесная среднетощая супесчаная; 2 – светло-серая лесная маломощная супесчаная; 3 – светло-серая лесная маломощная песчаная; 4 – серая лесная среднетощая легко суглинистая; 5 – серая лесная среднетощая тяжело суглинистая. Во избежание наложений графики для А и С сдвинуты относительно В влево и вправо соответственно

Содержание кадмия в горизонте С всех изученных почвенных разновидностей было значительно ниже, чем в горизонтах А и В, и более равномерным. Таким образом, источником поступления кадмия в горизонт А, где локализуется основная масса мицелия грибов и корневых окончаний растений, являются не подстилающие почву породы, а атмосферные выпадения и отмирающая биомасса живых организмов.

Проведенные сравнения типов почв по совокупности всех горизонтов показало наибольшее сходство между средне- и маломощными светло-серыми лесными супесчаными почвами (рис. 2). Наиболее близка к ним по количеству кадмия песчаная маломощная почва. Максимальные отличия имеет тяжело суглинистая почва.

Вовлечение соединений кадмия в биогенный круговорот в лесных экосистемах идет двумя путями. Первый основной происходит через микоризообразующие грибы, передающие кадмий через симбиотические структуры в растения, а также через активные корневые окончания последних. Второй путь связан с непосредственным поглощением кадмия из атмосферных выпадений лишайниками и мхами, не име-

ющими корневых систем и трофически не связанных с почвой.

Грибы играют основную роль в трансформации химических элементов из почвы в биологические объекты в лесных экосистемах [20, 22, 26]. Они оказывают существенное влияние на подвижность и биодоступность химических элементов. Грибы повышают ее путем выщелачивания из минеральных компонентов почвы и высвобождения из состава органического вещества при его разложении. В то же время они снижают ее благодаря сорбции на поверхности мицелия, внутриклеточному поглощению и связыванию с экзо-метаболитами [19, 30, 32].

По своей функциональной роли в лесных экосистемах грибы подразделяют на ряд эколого-трофических групп [1]. Для изучения закономерностей накопления кадмия грибами класса агарикомицетов (*Agaricomycetes*) было взято по десять наиболее распространенных видов, относящихся к трем эколого-трофическим группам: ксилотрофам, напочвенным сапротрофам и симбиотрофам.

Среднее содержание кадмия в плодовых телах агарикомицетов составило 0,127 мг/кг. Однако в накоплении кадмия представителями различных эколого-

трофических групп имеются некоторые особенности. Наиболее высоким медианное содержание кадмия оказалось в напочвенных сапротрофах, самое низкое – в симбиотрофах (рис. 4). Ксилотрофы по этому показателю заняли среднее положение. Изученные виды грибов существенно отличались друг от друга по накоплению кадмия, на что указывают разбросы вокруг медианных показателей. В наибольшей степени эти различия выражены в эколого-трофической группе симбиотрофов (рис. 4, 5). Самое высокое содержание кадмия было найдено у *Amanita muscaria* (L.) Lam – 1350 мкг/кг, минимальное (3,0) – у *Suillus bovinus* (L.) Roussel, то есть максимальный показатель превысил минимальный в 450 раз. Относительно большое значение этого показателя выявлено у *Xerocomellus porosporus* (Imler ex Watling) Sutara. В плодовых телах остальных видов – *Lactarius pubescens* Fr., *Leccinum aurantiacum* (Bull.) Gray, *Paxillus obscurisporus* C.Hahn, *Royoporos badius* (Pers.) A.B.De, *Russula foetens* Pers., *Suillus granulatus* (L.) Roussel и *Xerocomus subtomentosus* (L.) Qué1 – содержание было относительно низким.

Указанные различия не связаны с содержанием кадмия в питающих субстратах, а зависят главным образом от биологических особенностей видов агарикомицетов. Это подтверждает то, что характер накопления кадмия в плодовых телах агарикомицетов имеет видовую специфичность. Отмеченная закономерность проявлялась не только у симбиотрофов, но и у пред-

ставителей других эколого-трофических групп – напочвенных сапротрофов и ксилотрофов.

При изучении содержание кадмия в вегетативных органах растений различных жизненных форм: деревьев, кустарников и многолетних трав (рис. 6) – было установлено, что наиболее активно кадмий накапливали деревья, наименее активно – травы. Кустарники по этому показателю занимают среднее положение.

Содержанию кадмия в вегетативных органах соудистых растений свойственна видовая специфичность. Выявленные нами различия оказались статистически значимыми. По содержанию кадмия (мкг/кг) в вегетативных органах древесные растения распределились в следующей последовательности: береза повислая (*Betula pendula* Roth) – 118,4; дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) – 54,2; сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – 31,8; липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.) – 186; бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosus* L.) – 14,0; жимолость лесная (*Lonicera xylosteum* L.) – 13,0; лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) – 12,5. На способность *B. pendula* накапливать кадмий в наибольших количествах по сравнению с другими деревьями указывают и другие исследователи [3].

Среднее содержание кадмия в вегетативных органах изученных видов трав (ветреница лютиковая *Anemone ranunculoides* L., звездчатка жестколистная *Stellaria holostea* L., осока волосистая *Carex pilosa*

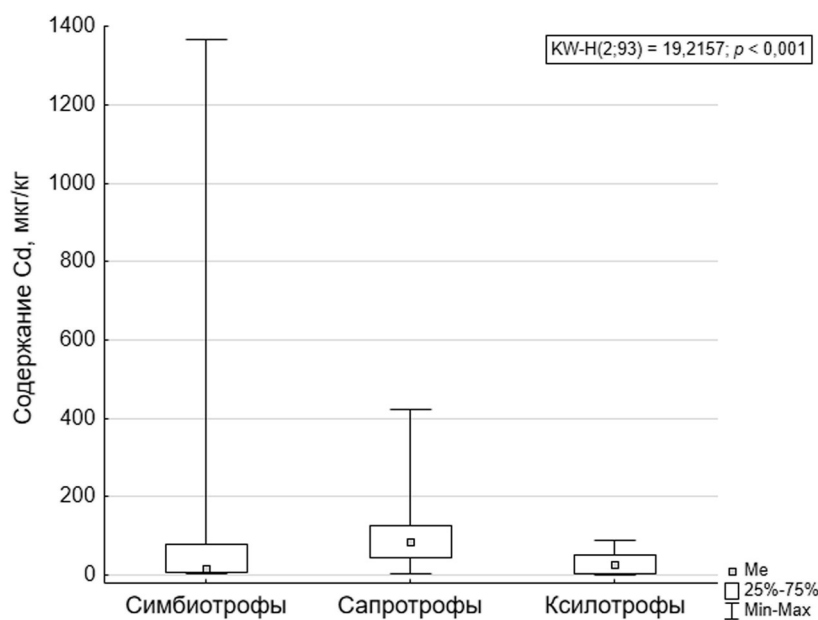


Рис. 4. Содержание кадмия в плодовых телах грибов различных трофических групп и результат теста Краскела-Уоллиса на различие между значениями медиан

Scop. и съедобная обыкновенная *Aegopodium podagraria* L.) составляет 7,1 мкг/кг, что в 8 раз ниже, чем у деревьев, и в 2,5 раза ниже, чем у кустарников.

Результаты определения кадмия в организмах беспозвоночных животных различных систематических и трофических групп представлены на рис. 7. В наи-

большем количестве кадмий накапливали личинки кольчатого шелкопряда (*Malacosoma neustria* L.). Такое активное накопление тяжелых металлов в пастбищной цепи питания может определяться активным питанием и быстрым ростом личинок. Кадмий не успевает выводиться из их организмов и накапливается в жировом теле [14].

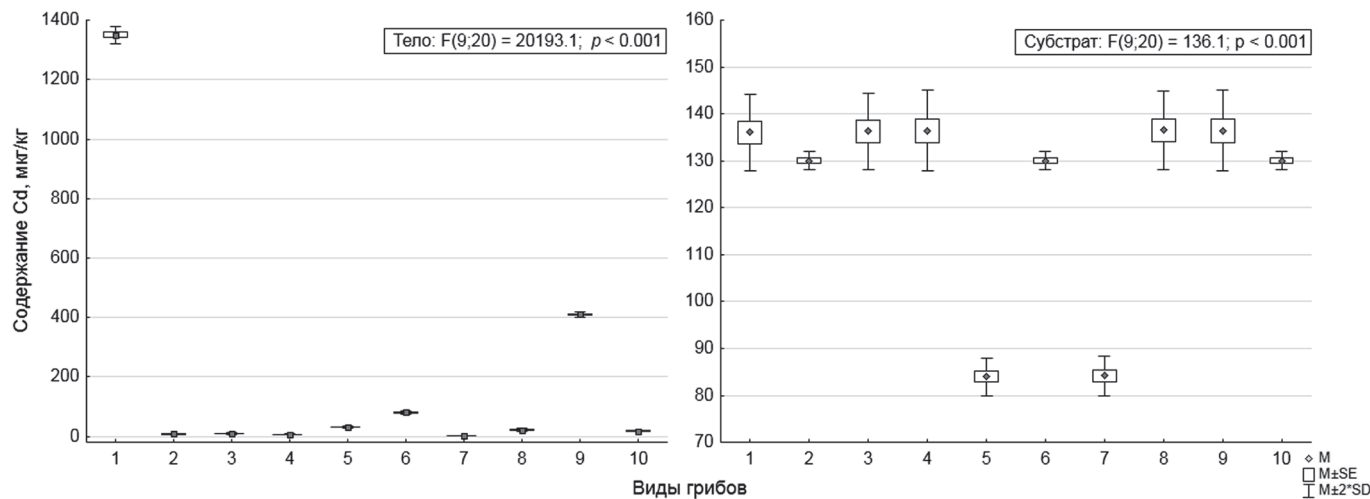


Рис. 5. Диаграмма средних значений содержания кадмия в плодовых телах симбиотрофов, их субстратах и результаты дисперсионного анализа: 1 – *Amanita muscaria*, 2 – *Lactarius pubescens*, 3 – *Leccinum aurantiacum*, 4 – *Paxillus obscurisporus*, 5 – *Royoporus badius*, 6 – *Russula foetens*, 7 – *Suillus bovinus*, 8 – *S. granulatus*, 9 – *Xerocomellus porosporus*, 10 – *Xerocomus subtomentosus*

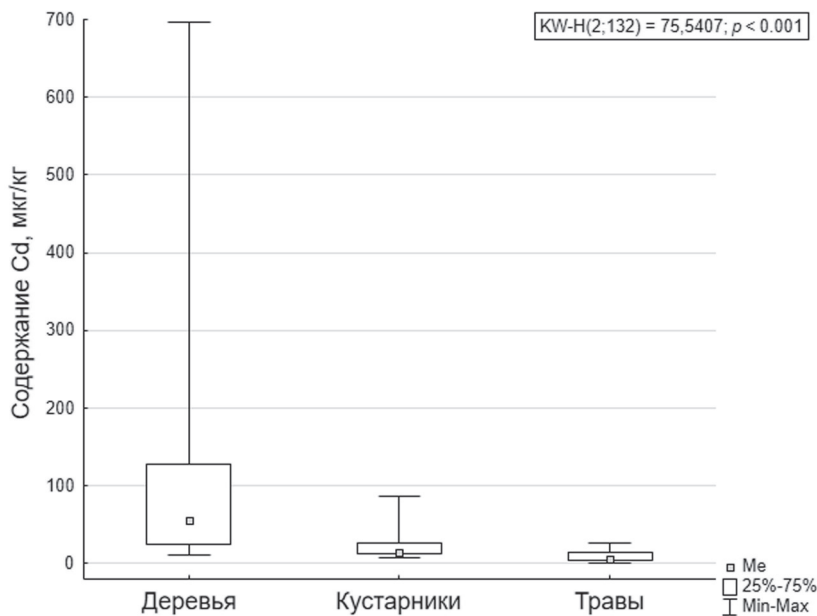


Рис. 6. Содержание кадмия в вегетативных органах сосудистых растений различных жизненных форм и результат теста Краскела–Уоллиса на различие между значениями медиан

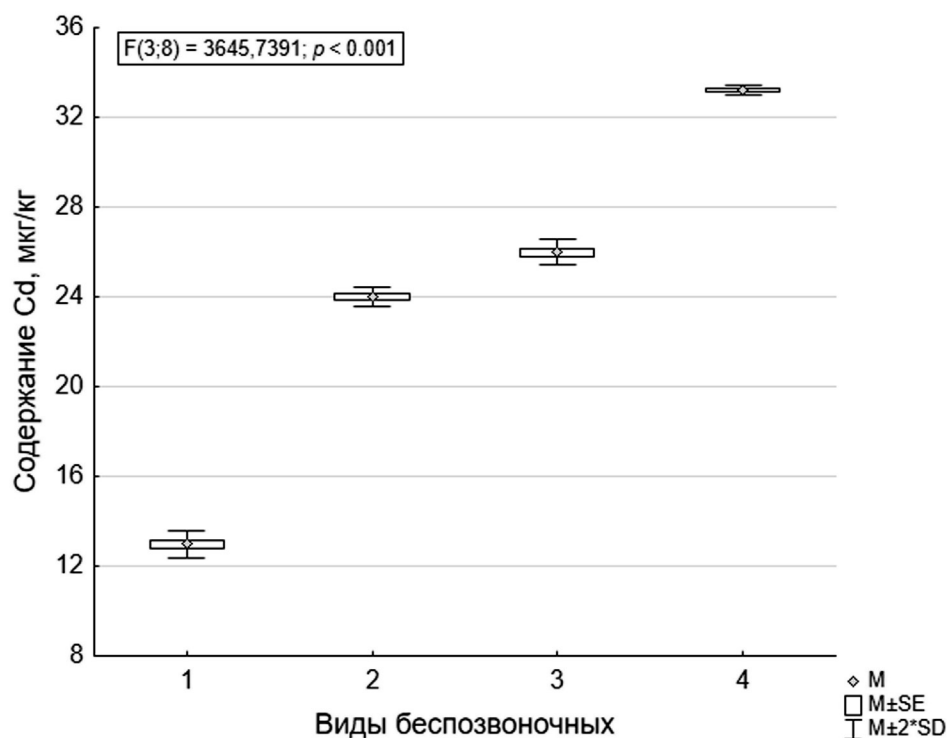


Рис. 7. Диаграмма средних значений содержания кадмия у разных видов беспозвоночных животных и результаты дисперсионного анализа: 1 – *Lumbricus* sp., 2 – *Lasius niger*, 3 – *Carabus auratus*, 4 – *Malacosoma neustria*

В детритной пищевой цепи, важнейшее звено которой составляют дождевые черви (род *Lumbricus* L.), накопление кадмия было менее активно. Основной пищей этих беспозвоночных являются частицы лесной подстилки, в первую очередь опавшие листья, содержащие мицелий грибов сапротрофов. Кроме того, они заглатывают огромное количество почвы, из которой усваивают органические вещества. Определенная нами концентрация кадмия в организмах *Lumbricus* sp. была в 22 раза ниже среднего показателя для серых лесных почв и в 35 раз ниже среднего показателя для листьев древесных растений. Сведения о том, что дождевые черви не являются накопителями кадмия, имеются и в работах других исследователей [17, 18].

В организмах хищных насекомых – черный садовый муравей *Lasius niger* L. и жулицица *Carabus auratus* L.) – содержание кадмия примерно одинаковое (24,0 и 26,0 мкг/кг соответственно). *L. niger* питается мелкими беспозвоночными и сладкой падью, которую выделяют тли. *C. auratus* питается наземными беспозвоночными – насекомыми и дождевыми червями и т. п. [28]. Таким образом, у вторичных консументов содержание кадмия незначительно превышает таковое в организмах первичных консументов (*Lumbricus* sp.). А у листогрызущих личинок *M. neustria* оно оказалось даже более высоким.

Полученные данные указывают на то, что при переходе с одного трофического уровня на другой в усло-

виях лесных экосистем в организмах беспозвоночных животных не происходит сильного увеличения содержания кадмия, какое отмечено в морских экосистемах. Вероятно, у наземных видов кольчатых червей и насекомых в процессе эволюции выработались защитные механизмы, препятствующие биологической аккумуляции тяжелых металлов.

Лишайники и мхи в биогеохимических циклах тяжелых металлов занимают особое место. Это связано с тем, что они не имеют корневых систем и получают воду и элементы минерального питания главным образом из атмосферных выпадений, которые активно впитываются поверхностью слоевищ и талломов. Субстраты обитания не оказывают существенного влияния на элементный состав этих организмов [24, 25, 27]. Таким образом, лишайники и мхи вовлекают кадмий в биогенный круговорот автономно, минуя основной поток микроэлементов, идущий через почву, микоризообразующие грибы и растения.

Мы определяли кадмий в слоевищах лишайников и талломов мхов наиболее распространенных в Пензенской области видов: *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Cladonia sylvatica* (L.) Hoffm., *Parmelia sulcata* Tayl., *Dicranum polysetum* Sw., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Stereodon pallescens* (Hedw.) Mitt.

Среднее содержание кадмия в слоевищах лишайников составило 166,0 мкг/кг, в 2,1 раза выше, чем в ве-

гетативных органах травянистых растений. Для мхов по сравнению с лишайниками этот показатель был в 2,5 раза ниже – 66,0 мкг/кг, близко к среднему содержанию кадмия в травянистых сосудистых растениях.

Представители различных экологических групп лишайников и мхов накапливают кадмий не одинаково (рис. 8). Эпифитные виды мхов и лишайников *H. physodes*, *P. sulcata* и *S. pallescens* накапливают этот элемент несколько активней, чем эпигейные виды *C. sylvatica* и *P. schreberi*, развивающиеся на почве. У первых среднее содержание кадмия 171,0 мкг/кг, для вторых – 83,0 мкг/кг (рис. 8).

Активное накопление кадмия эпифитными мхами и лишайниками может быть связано с тем, что их талломы очень гигроскопичны. В сухую погоду они не способны удерживать влагу и очень быстро ее теряют. Содержавшиеся же в атмосферных выпадениях поллютанты, в том числе и соединения кадмия, концентрируются в их талломах. Особенно быстро теряют влагу не связанные с почвой эпифиты. Эпигейные виды, контактирующие с влажной почвой, дольше удерживают воду, и потому их талломы не так активно поглощают атмосферные выпадения, что отражается на количестве задерживающихся в них поллютантов. Поэтому эпифитные мхи и лишайники эффективней использовать для экологического мониторинга в качестве индикаторов загрязнения воздуха [7, 8, 21, 24]. Наиболее интересным, с этой точки зрения, видом является эпифитный лишайник *H. physodes*. Для него была определена максимальная

концентрация кадмия в талломе. На перспективность данного вида с точки зрения экологического мониторинга указывают и другие авторы [24, 25].

Заключение

Содержание кадмия в почвах района исследований ниже средних показателей для почв мира и других изученных районов территории России. Это является важной особенностью геохимии изученной части Приволжской возвышенности. Среднее содержание кадмия в изученных биологических объектах сопоставимо с данными других исследователей и находится на уровне минимальных и средних показателей, приводимых в литературных источниках.

Изученные представители различных систематических групп живых организмов существенно отличаются друг от друга по содержанию кадмия (рис. 9). Максимальные концентрации были зафиксированы для лишенизированных грибов. Грибы агарикомицеты несколько уступали им по данному показателю. Сравнительно высоким было содержание кадмия в талломах мхов. Сосудистые растения содержали кадмий в меньших концентрациях. Минимальные значения были определены для беспозвоночных животных.

В пределах изученных систематических групп организмов наблюдается изменчивость концентраций кадмия в биоматериале отдельных видов, на что указывает анализ медианных показателей. В наибольшей степени она выражена у агарикомицетов и сосудистых растений.

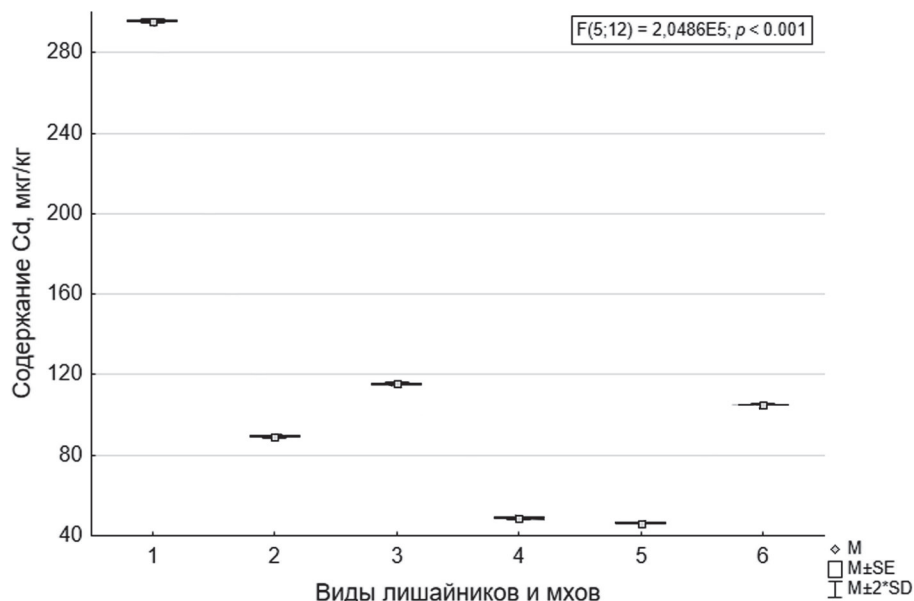


Рис. 8. Диаграмма размаха варьирования содержание кадмия в талломах лишайников, мхов и результаты дисперсионного анализа: 1 – *Hypogymnia physodes*, 2 – *Cladonia sylvatica*, 3 – *Parmelia sulcata*, 4 – *Dicranum polysetum*, 5 – *Pleurozium schreberi*, 6 – *Stereodon pallescens*

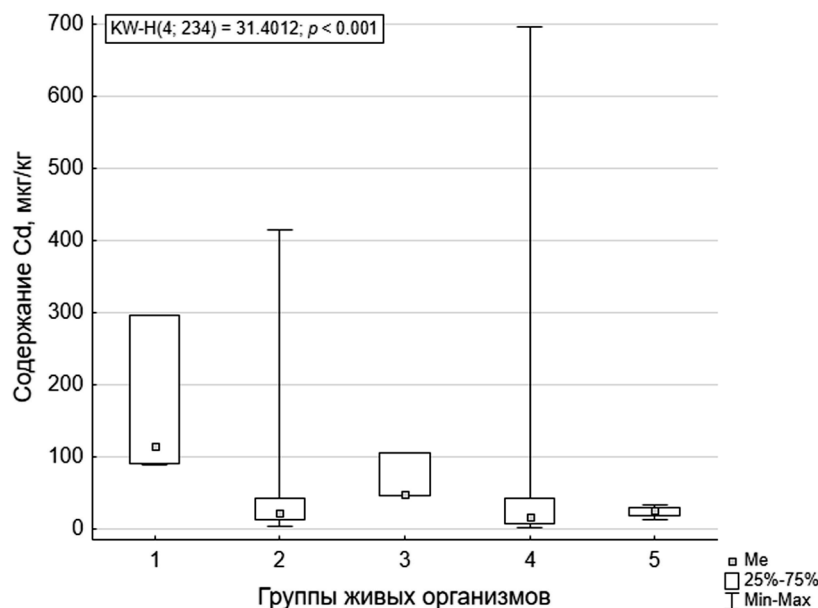


Рис. 9. Содержание кадмия в биоматериале различных групп живых организмов и результат теста Краскела–Уоллиса на различие между значениями медиан: 1 – лишайники, 2 – агарикомицеты, 3 – моховидные, 4 – сосудистые растения, 5 – беспозвоночные животные

Во всех изученных группах организмов имеются виды-накопители, содержание кадмия в биоматериале которых существенно превышает средние значения и не зависит от концентрации кадмия в питающих субстратах. Среди агарикоидных грибов наиболее высоким содержанием кадмия отличается *Amanita muscaria* (в 10 раз выше, чем в среднем). Среди деревьев в этом плане выделяется *Betula pendula* (в

1,5 раза выше, чем в среднем у деревьев). Среди лесных трав наиболее активно концентрирует кадмий осока *Carex pilosa* (в 2,7 раза выше, чем в среднем). Таким образом, на активность накопления кадмия существенное влияние оказывает видовая принадлежность биологического объекта и связанные с ней индивидуальные особенности физиологии и биохимии организма.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Бурова ЛГ. Экология грибов макромицетов. М.: Наука; 1986.
2. Бурцева ЛВ, Конькова ЕС. Свинец и кадмий в атмосферном воздухе и осадках в фоновых районах восточно-европейского региона. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2016;(2):59-70.
3. Ветчинникова ЛВ, Кузнецова ТЮ, Титов АФ. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях севера. Труды Карельского научного центра РАН. 2013;(3):68-73.
4. Виноградов АП. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР; 1950.
5. Виноградов АП. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. Геохимия. 1962;(7):555-71.
6. Григорьева НА. Распределение цинка, кадмия и ртути в горных породах, представляющих верхнюю часть континентальной коры. Уральский геологический журнал. 2007;(6):126-38.
7. Дунаева ТА. Лишайника Пензенской области и возможности их применения в мониторинге

- природных сред. Автореф. канд. дисс. Пенза: ГСХА; 2012.
8. Иванов АИ. Использование организмов различных таксономических групп для мониторинга окружающей среды. Теоретическая и прикладная экология. 2007;(2):72-8.
 9. Иванов АИ, Кузин ЕН. К вопросу о разнообразии почвенного покрова Пензенской области. II. Серые лесные почвы. Нива Поволжья. 2017;45(4):70-5.
 10. Иванов АИ, Чернышов НВ, Кузин ЕН. Природные условия Пензенской области. В кн.: Геологическая среда, рельеф, климат, поверхностные воды, почвы, растительный покров: Современное состояние. Т. 1. Пенза: РИО ПГСХА; 2017.
 11. Кривитский ВА, Орешкин ВН, Беляев ЮИ. Кадмий в почвах и горных породах Южного Урала. Геохимия. 1988;(6):857-67.
 12. Кузнецов АВ, Фесюн АП, Самохвалов СГ, Махонько ЭП. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Москва: ЦИНАО; 1992.
 13. Лукин СВ, Авраменко ПМ. Микроэлементы в почвах Белгородской области. Земледелие. 2008;(7):21-2.
 14. Некрутенко ЮП. Семейство коконопряды – Lasiosampidae. В кн.: Вредители сельскохозяйственных культур и лесных насаждений. Членистоногие. Т. 2. Киев: Урожай; 1974. С. 354-7.
 15. Пильгук ОН. Экологическая оценка состояния кадмия в системе почва–растение в условиях Семипалатинского Прииртышья. Автореф. канд. дисс. Семипалатинск: Новосибирский государственный университет; 2005.
 16. Протасова НА, Щербаков АП. Особенности формирования микроэлементного состава зональных почв Центрального Черноземья. Почвоведение. 2004;(1):50-9.
 17. Резниченко ИС. Накопление Cd, Cu, Zn, Pb почвенными и почвенно-подстилочными морфо-экологическими типами дождевых червей в условиях вермикультивирования. Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2017;(4):1-5.
 18. Рыбак ТА, Майстренко ИО, Валегжанов ИО, Белых ЕС. Влияние кадмия на дождевых червей, населяющих фоновые и техногенно загрязненные участки. Вестник ВГУ, сер. хим. биол. фармац. 2018;(2):235-45.
 19. Сазанова КВ, Великанова ВД, Столярова НВ. Накопление тяжелых металлов грибами. Экологическая и видовая специфичность, механизмы аккумуляции, потенциальная опасность для человека. Российский биомедицинский журнала. 2017;18:336-61.
 20. Селиванов ИА. Микосимбиотрофизм как форма консортивных связей в растительном покрове Советского Союза. М.: Наука; 1981.
 21. Серебрякова НН. Эколого-биологические особенности листостебельных мхов и их использование в экологическом мониторинге (на примере Пензенской области). Автореф. канд. дисс. Саратов: СГУ; 2009.
 22. Смит С, Рид Д. Микоризный симбиоз. Москва: КМК; 2012.
 23. Четверикова НС, Марциневская ЛВ. Кадмий в агроландшафтах лесостепной зоны. Достижения науки и техники в АПК. 2013;(7):69-70.
 24. Шарунова ИП. Содержание тяжелых металлов в разных частях таллома лишайника *Hypogymnia physodes*. В кн.: Экологические механизмы динамики и устойчивости биоты. Екатеринбург: Академкнига; 2004. С. 300-5.
 25. Шарунова ИП. Влияние форофита на аккумуляцию тяжелых металлов лишайником *Hypogymnia physodes*. В кн.: Грибы и водоросли в биоценозах-2006. Москва: МГУ; 2006. С. 174-7.
 26. Шубин ВИ. Микотрофность древесных пород. Л.: Наука; 1973.
 27. Чмеренко АВ, Шевченко ВП, Саввичев АС, Политова НВ. Геохимия кустистых эпифитных лишайников. В кн.: Материалы XX российской конференции молодых ученых памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2009. С. 185-8.
- Общий список литературы/Reference List**
1. Burova LG. Ekologiya Gribov Makromitsetov. [Ecology of Macromycete Mushrooms]. Moscow: Nauka; 1986. (In Russ.)
 2. Burtseva LV, Kon'kova YeS. [Lead and cadmium in atmospheric air and precipitation in the background areas of the Eastern European region]. Problemy Ekologicheskogo Monitoringa i Modelirovaniya Ekosistem. 2016(2):59-70. (In Russ.)
 3. Vetchinnikova LV, Kuznetsova TYu, Titov AF. [Features of accumulation of heavy metals in leaves of woody plants in urbanized territories in the North]. Trudy Karelskogo Nauchnogo Tsentra RAN. 2013;(3):68-73. (In Russ.)
 4. Vinogradov AP. [Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils]. Moscow: AN SSSR; 1950. (In Russ.)
 5. Vinogradov AP. [Mean contents of chemical elements in the main types of eruptive rocks of Earth crust]. Geokhimiya. 1962;(7):555-71. (In Russ.)

6. Grigoryeva NA. [Distribution of zinc, cadmium and mercury in rocks representing the upper part of the continental crust]. *Uralskiy Geologicheskii Zhurnal*. 2007;(6):126-38. (In Russ.)
7. Dunayeva TA. [Lichens of Penza Region and Possibilities of Their Application in Monitoring of Natural Environments]. PhD Theses. Penza: GSHA; 2012. (In Russ.)
8. Ivanov AI. [Use of organisms of various taxonomic groups for environmental monitoring]. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya*. 2007;(2):72-8. (In Russ.)
9. Ivanov AI, Kuzin YeN. [On the issue of the diversity of soil cover of the Penza Region. II. Grey forest soils]. *Niva Povolzhya*. 2017;45(4):70-5. (In Russ.)
10. Ivanov AI, Chernyshov NV, Kuzin YeN. [Natural conditions of Penza region]. In: *Geologicheskaya Sreda, Relyef, Klimat, Poverkhnostnye Vody, Pochvym Rasitelnyi Pokrov: Sovremennoye Sostoyaniye T. 1*. Penza: RIO PGSKhA; 2017. (In Russ.)
11. Krivitsky VA, Oreshkin VN, Beliayev YuI. [Cadmium in soils and rocks of the Southern Ural]. *Geokhimiya*. 1988;(6):857-67. (In Russ.)
12. Kuznetsov AV, Fesyun AP, Samokhvalov SG, Makhonko EP. *Metodichaskiye Ukazaniya po Opredeleniyu Tiazholykh Metallov v Pochvakh Selkhozugodiy i Produktsii Rasteniyevodstva*. [Methodical Instructions on the Determination of Heavy Metals in Soils of Farmland and in Crops]. Moscow: TsINAo; 1992. (In Russ.)
13. Lukin SV, Avramenko PM. [Trace elements in soils of Belgorodskaya Oblast]. *Zemledeliye*. 2008;(7):21-2. (In Russ.)
14. Nekrutenko YuP. [Lappet moths Lasiocampidae family]. In: *Vrediteli Selskokhoziaystvennykh Kultur i Lesnyh Nasazhdeniy. Chlenistonogiye. T. 2*. Kiev: Urozhay; 1974. P. 354-7. (In Russ.)
15. Pilguk ON. [Ecological assessment of cadmium in the soil-plant system under conditions of Semipalatinsk Priirtyshye]. PhD Theses. Semipalatinsk: Novosibirskiy Gosudarstvennyi Universitet; 2005. (In Russ.)
16. Protasova NA, Scherbakov AP. [Characteristics of development of the microelement composition of zonal soils of the Central Black Earth Region]. *Pochvovedeniye*. 2004;(1):50-9. (In Russ.)
17. Reznickenko IS. [Accumulation of Cd, Cu, Zn, Pb by soil and soil-underlying morphoecological types of earthworms under vermiculture conditions]. *Elektronnyi Nauchno-Metodicheskiy Zhurnal Omskogo GAU*. 2017;(4):1-5. (In Russ.)
18. Rybak TA, Maystrenko IO, Valegzhanov IO, Belykh YeS. [The influence of cadmium on earthworms inhabiting background and contaminated areas]. *Vestnik VGU Ser Khim Biol Farmats*. 2018;(2):235-45. (In Russ.)
19. Sazanova KV, Velikanova VD, Stoliarova NV. [Accumulation of heavy metals by mushrooms. Ecological and Species Specificity, mechanisms, and potential danger to humans]. *Rossiyskiy Biomeditsynskiy Zhurnal*. 2017;18:336-61. (In Russ.)
20. Selivanov IA. *Mikosimbiotrofizm Kak Forma Konsortivnykh Sviazey v Rastitelnom Pokrove Soverskogo Soyuza*. [Mycosymbiotrophism as a Form of Consortism in the Plant Cover of the Soviet Union]. Moscow: Nauka; 1981. (In Russ.)
21. Serebriakova NN. [Ecological and Biological Characteristics Leafy Mosses and Their Use in Environmental Monitoring in Penza Region]. PhD Theses. Saratov: SGU; 2009.
22. Smith S, Reed D. *Mikorizbyi Simbioz*. [Mycorrhizal Symbiosis]. Moscow: KMK; 2012. (In Russ.)
23. Chetverikova NS, Martsinevskaya LV. [Cadmium in agrolandscapes of the forest-steppe zone]. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki v APK*. 2013;(7):69-0. (In Russ.)
24. Sharunova IP. [Heavy metal content in different parts of the thallus of *Hypogymnia physodes* lichen]. In: *Ekologicheskkiye Mekhanizmy Dinamiki i Ustoychivosti Bioty*. Ekaterinburg: Akademkniga; 2004. P. 300-5. (In Russ.)
25. Sharunova IP. [Effect of phorophyte on accumulation of heavy metals by *Hypogymnia physodes* lichen]. In: *Griby i Vodrosli v Biotsenozakh-2006*. Moscow: MSU; 2006. P. 174-7. (In Russ.)
26. Shubin VI. *Mikotrofnost' Drevesnykh Porod*. [Mycotrophicity of Woody Plants]. Leningrad: Nauka; 1973. (In Russ.)
27. Chmerenko AV, Shevchenko VP, Savvichev AS, Politova NV. [Geochemistry of fruticose epiphytic lichens]. In: *Matererialy XX Rossiyskoy Konferentsii Molodykh Uchenykh Pamyati Chl.-Korr. AN SSSR K.O. Krattsya*. Petrozavodsk: Karelskiy Nauchnyi Tsentri RAN; 2009. P. 185-8. (In Russ.)
28. Brussow H. *The Quest For Food: A Natural History of Eating*. Springer; 2007.
29. Detrain C, Prieur J. Sensitivity and feeding efficiency of the black garden ant *Lasius niger* to sugar resources. *J Insect Physiol*. 2014;64:74-80.
30. Gadd GM. Interaction of fungi with toxic metals. *New Phytologist*. 1993;124:25-60.
31. Hammer O, Harper DAT, Ryan PD. PAST: Palaeontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol Electronica*. 2001;4(1):4-9.
32. Howe R, Evans RI, Ketteridge SW. Copper-binding proteins in ectomycorrhizal fungi. *New Phytologist*. 1997;135:123-31.