

УДК 666.123.4; 57.042; 630*443.3
DOI 10.34014/2227-1848-2025-1-135-148

МАКРОМИЦЕТЫ КАК ИНДИКАТОРЫ АНТРОПОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Б.П. Чураков¹, У.П. Зырянова², Б.С. Сапонов¹, В.С. Гусарова³

¹ ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, Россия;

² Ульяновский филиал ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации», г. Ульяновск, Россия;

³ ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, Россия

Микобиота является группой живых организмов, характеризующейся не только высокой устойчивостью к факторам техногенной природы, но и способностью к аккумуляции таких веществ, как тяжелые металлы. Данное свойство позволяет использовать отдельных представителей макромицетов в экологическом мониторинге лесных экосистем.

Цель. Определение влияния абиотических и техногенных факторов на аккумуляцию тяжелых металлов плодовыми телами макромицетов для использования в биоиндикации загрязнения поллютантами лесных экосистем Среднего Поволжья.

Материалы и методы. Были изучены плодовые тела доминирующих макромицетов (почвенных и дереворазрушающих грибов) на территории лесных экосистем с различным уровнем техногенной нагрузки. Определялось содержание свинца, никеля, меди, кадмия, цинка, кобальта и железа. Местами отбора проб стали парк г. Ульяновска «Винновская роща», площадка в Ульяновском лесничестве (2 км от г. Ульяновска) и площадка в Кузоватовском лесничестве (100 км от г. Ульяновска, контрольный вариант). Пробные площадки имели сходные лесорастительные условия.

Результаты. Выявлено, что среди экологических групп макромицетов сорбционные способности по отношению к общему объему тяжелых металлов ярче всех выражены у микоризообразующих грибов. В эволюционном развитии наблюдалось уменьшение содержания поллютантов по мере продвижения от облигатных сапротрофов к облигатным паразитам, т.е. от эволюционно старых к эволюционно молодым. Аккумуляция ТМ в почвенных грибах при усилении воздействия техногенного фактора происходит интенсивнее, чем в дереворазрушающих, что объясняется типом субстрата, на котором произрастают грибы. В экологической цепи «почва – древесина – трутовик» наблюдается рост содержания тяжелых металлов по мере продвижения к высшему трофическому звену консументов от сапротрофов.

Ключевые слова: макромицеты, тяжелые металлы, абиотические факторы, техногенные факторы, лесные экосистемы.

Введение. Общеизвестным является факт высокой токсичности тяжелых металлов (ТМ) для природной среды и человека. Однако отдельные живые организмы, например макромицеты, обладают способностью к биоаккумуляции ТМ без видимых изменений [1]. При этом ряд авторов [2–5] выявил у некоторых грибов-микоризообразователей признаки угнетения мицелия, обусловленные ослаблением дерева-симбионта вследствие интенсивной аккумуляции ТМ, т.е. происходит нарушение обоих организмов, участвующих в симбиозе. В литературе встречаются данные, сви-

детельствующие о том, что базидиальные макромицеты могут аккумулировать поллютанты разного происхождения. Эта особенность определяет их как потенциальные биологические индикаторы воздействий на природную среду [6–10]. Достаточно много трудов посвящено аккумуляционным свойствам базидиомицетов в отношении ТМ в городских ландшафтах, при этом поведение тех же представителей микобиоты в ненарушенных лесных экосистемах остается малоизученным [11–13]. Ранее нами проводились исследования, касающиеся загрязнения тяжелыми метал-

лами и радионуклидами территорий Ульяновской области, подвергшихся облучению в результате Чернобыльской аварии. Однако в данных работах также имел место ярко выраженный антропогенный фактор [9, 14]. Ульяновская область выбрана для проведения исследований, так как характеризуется невысоким уровнем техногенного воздействия [15], и поэтому накопление токсичных элементов может не сразу отражаться на морфологическом строении лесной растительности. В связи с этим актуальным становится изучение процессов миграции поллютантов по всем составным компонентам лесных экосистем. В

частности, необходимо выявить особенности аккумуляции металлов в плодовых телах макромицетов в зависимости от их видовой принадлежности и трофности.

Цель исследования. Выявление влияния абиотических и техногенных факторов на аккумуляцию тяжелых металлов плодовыми телами макромицетов для использования в биоиндикации загрязнения поллютантами лесных экосистем Среднего Поволжья.

Материалы и методы. Исследования проводились на следующих участках в пределах Ульяновской области (рис. 1).

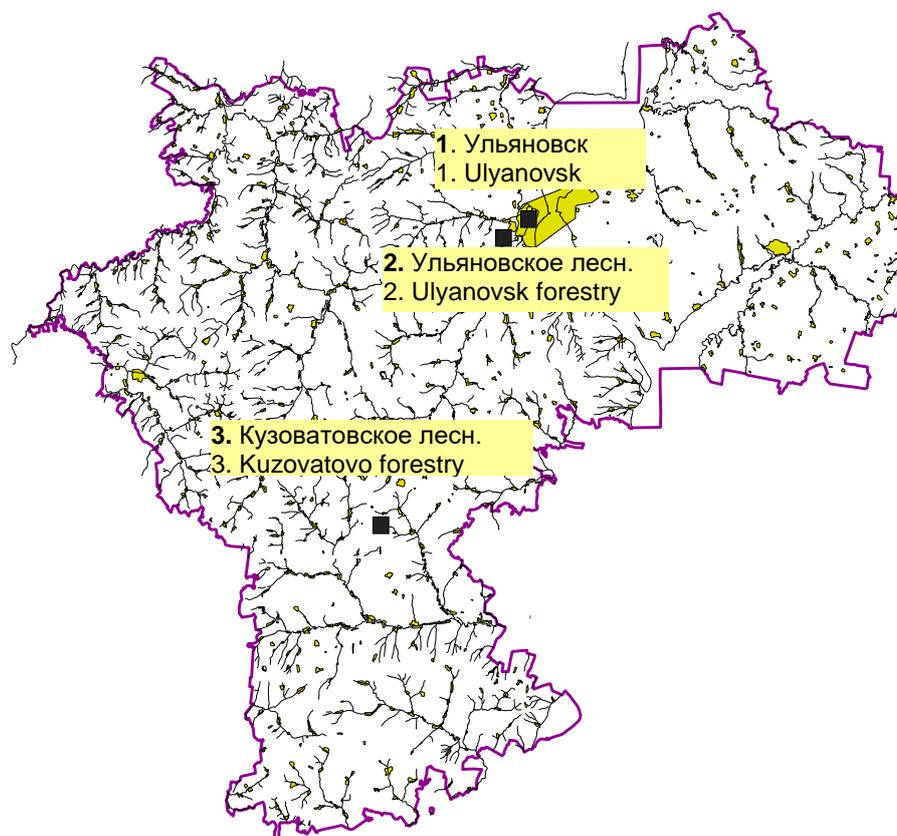


Рис. 1. Места отбора проб в лесных экосистемах Ульяновской области (масштаб 1:2 000 000)

Fig. 1. Sampling locations in forest ecosystems of the Ulyanovsk region (scale 1:2 000 000)

Участок 1. Урбанизированная территория – парк г. Ульяновска «Винновская роща», имеющий статус особо охраняемой природной территории местного значения. Ближайшими источниками техногенного воздействия являются автотранспорт на расположенной вдоль парка дороге и Ульяновский моторный

завод – предприятие по производству силовых агрегатов различной модификации для грузовых, пассажирских и многоцелевых автомобилей марки «ГАЗ» и «УАЗ» (2 км от парка).

Участок 2. Участок в Ульяновском лесничестве, расположенный в 2 км от г. Ульяновска вблизи с. Белый Ключ.

Участок 3. Участок в Кузоватовском лесничестве, расположенный в 100 км от г. Ульяновска (контрольный вариант).

Участки для отбора проб имеют схожие лесорастительные условия [15], состав лесонасаждений представлен доминирующими лесными породами деревьев: *Pinus silvestris* L., *Quercus robur* L., *Populus tremula* L. Из характеристик лесонасаждений, полученных на основании лесотаксационных материалов лесничеств, следует отметить возраст доминирующих пород – 90 лет, высокую бонитетность – II, полноту – 0,8; напочвенный покров представлен осокой, лишайниками и земляникой. Участки подбирались со схожим типом почвенного слоя – светло-серые лесные.

В качестве объекта исследования были выбраны плодовые тела доминирующих макромицетов. В них оценивалось содержание железа, цинка, меди, никеля, кадмия, свинца и кобальта, поскольку данные металлы определяют антропогенную нагрузку исследуемых территорий. Отбор проб макромицетов и анализ концентрации ТМ в плодовых телах грибов осуществлялись согласно Методическим указаниям по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства, утвержденным Минсельхозом РФ от 10.03.1992. Изучение плодовых тел макромицетов проводилось в конце вегетационного периода, который характеризуется наивысшим пиком плодоношения у многих представителей микобиоты [3].

Доминанты на обследуемых участках определялись методом маршрутных ходов с учетом двух видов субстрата: на почве (гумусовые сапротрофы и микоризообразователи) и стволах трех пород деревьев – сосны, дуба и осины (ксилотрофы). Маршрут выбирался произвольно, учет видов макромицетов велся равномерно по непересекающейся траектории. Длина площадки составляла 1 км с охватом ста стволов деревьев с плодовыми телами ксилотрофной микобиоты. Собранный материал также классифицировался по эволюционным группам: по типу питания – паразиты и сапротрофы, которые могут быть облигатными (обязательными) или факультативными (необязательными).

Преобладание видов микобиоты из числа микоризообразователей и гумусовых сапротрофов фиксировалось глазомерно по количеству плодовых тел. При этом одним из главных условий идентификации считались ярко выраженные признаки видовой принадлежности макромицетов. Морфологические признаки и названия грибов определялись по базе <https://www.mycobank.org/> [16] и справочникам М.А. Бондарцевой [17, 18].

В совокупности проведено по десять ходов на каждом участке.

В соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 17.4.3.01-2017 сбор плодовых тел напочвенных макромицетов осуществляли путем срезания ножом шляпки и ножки гриба. В соответствии с методикой определения тяжелых металлов пробой считалась совокупность грибов одного вида, обнаруженных на одном участке, массой 1,2 кг. При сборе плодовых тел грибов-ксилотрофов придерживались аналогичной методики, но при этом срез осуществлялся с одинаковых пород деревьев на протяжении одного участка. Грибная масса помещалась в отдельные хлопчатобумажные мешочки, на которых фиксировали номер маршрута, таксационную формулу участка, дату, вид гриба по справочнику, породу дерева, на котором произрастал гриб (для ксилотрофов). Всего во время маршрутных ходов было собрано 96 проб грибов (48 проб напочвенных грибов и 48 проб грибов-ксилотрофов).

Подготовка проб к анализу на содержание ТМ производилась путем минерализации методом сухого озоления согласно МУК 4.1.985-00 «Определение содержания токсичных элементов в пищевых продуктах и продовольственном сырье. Методика автоклавной пробоподготовки». Плодовые тела грибов предварительно промывали и ополаскивали дистиллированной водой, затем измельчали ножом и в сушильном шкафу при температурном режиме в 90 °С доводили массу пробы до постоянной. Усушенную пробу измельчали в лабораторной мельнице и отправляли в муфельную печь на озоление.

Там сухой остаток обугливался до прекращения выделения дыма и получения черного

остатка. Далее пробы охлаждались, растирались и переносились в фарфоровые чашки для последующего озоления. Температура озоления для дальнейшего определения концентрации металлов составляла 400 °С. Готовая зола просеивалась через сито для удаления примесей, остывший зольный остаток взвешивался, определялся коэффициент озоления.

Пробы почвы высушивались до воздушно-сухого состояния в сушильных шкафах при температуре 105±2 °С. После удаления из пробы неразложившихся корней и остатков растений она взвешивалась. Затем сухую пробу просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм. Фракцию размером 2 мм собирали отдельно в полиэтиленовый пакет, взвешивали. Частицы менее 2 мм рассыпали на листе крафт-бумаги, тщательно перемешивали 6–7 раз с угла на угол, распределяли ровным слоем толщиной 0,5–1,0 см в виде квадрата или прямоугольника. Методом квадрирования отбиралась навеска пробы.

Анализы по измерению удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений проводили в соответствии со стандартизованными методическими указаниями на поверенном оборудовании.

Определение концентрации доступных растительным организмам подвижных форм ТМ (Cu, Pb, Zn, Ni, Cd, Co) в почвах производили методом извлечения металлов ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8. Оценку содержания подвижных соединений двух- и трехвалентного железа в почвах осуществляли по методу Веригиной – Аринушкиной (ГОСТ 27395-87).

Уровень ТМ в пробах грибов и субстрата измеряли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра ААС-3 методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ГОСТ 22001-87) в агрохимлаборатории г. Ульяновска. Чувствительность прибора, на котором проводили исследования, составляет 0,001 мг/л.

Результаты обрабатывались статистическим методом с определением среднего арифметического \bar{X} и ошибки среднего S_x .

Результаты и обсуждение. Одним из основных требований, предъявляемых к биоин-

дикаторам, является распространенность биологического вида по всей обследуемой территории. На исследуемых участках доминирующими видами оказались:

– на дубе – ложный дубовый трутовик (*Phellinus robustus* (Karst.) Bourd. et Galz.), кориолус разноцветный (*Coriolus versicolor* (Fr.) Quel.);

– на осине – ложный осиновый трутовик (*Phellinus tremulae* (Boriss.) Bond. et Boriss.), кориолус разноцветный (*Coriolus versicolor* (Fr.) Quel.);

– на сосне – сосновая губка (*Phellinus pini* (Thore ex Fr.) Pilat.), окаймленный трутовик (*Fomitopsis pinicola* (Fr.) Karst.);

– на почве – представители родов шампиньонов (*Agaricus* spp.) и сыроежек (*Russula* spp.).

Названия грибов приведены в соответствии с электронной базой данных MycoBank [16]. Идентификацию обнаруженных грибов производили по макропризнакам с помощью справочной литературы [17, 18].

Отметим, что в смешанных насаждениях среди трутовых грибов *Coriolus versicolor* преобладает не только на стволах дуба, но и на осине.

Наиболее многочисленной по таксономическому признаку является группа афиллофороидных гименомицетов порядка *Polyporales*, представленная тремя видами рода *Phellinus*, характеризующимися узкой специализацией по отношению к субстрату – монофагией.

Поступление ТМ в плодовые тела макромицетов происходит из атмосферного воздуха и субстрата, на котором они произрастают. Причем главным образом – через мицелий гриба (90 %). В качестве субстрата для макромицетов в лесных экосистемах выступают в основном почва и древесина. В зависимости от типа субстрата макромицеты представлены тремя основными экологическими группами: почвенные – микоризообразователи и гумусовые сапротрофы, а также дереворазрушающие грибы – ксилотрофы.

Доминантные представители макромицетов, выявленные на первом этапе исследования, распределяются по экологическим группам следующим образом:

– ксилотрофы: *Phellinus robustus*, *Phellinus pini*, *Fomitopsis pinicola*, *Coriolus versicolor*, *Phellinus tremulae*;

– гумусовые сапротрофы: *Agaricus* spp.;

– микоризообразователи: *Russula* spp.

Поскольку группа ксилотрофов представлена несколькими доминантными видами, была проведена сравнительная оценка концентрации ТМ в их образцах. Результаты химического анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Среднее содержание ТМ в плодовых телах ксилотрофов

Mean HM content in fruiting bodies of xylophores

Вид гриба Fungi species	Содержание ТМ, мг/кг HM content, mg/ kg							
	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Co	Fe	Σ ТМ Σ HM
<i>Ph. tremulae</i>	1,93±0,52	10,84±5,19	7,09±4,55	1,35±0,69	8,33±2,56	2,98±0,61	14,85±6,41	47,37
<i>Ph. robustus</i>	3,34±1,95	20,62±5,32	8,18±5,08	1,68±0,94	6,06±2,46	2,43±0,59	24,75±3,91	67,06
<i>C. versicolor</i>	16,86±4,71	13,68±4,00	3,32±1,15	1,32±0,37	13,16±1,44	4,18±0,45	47,36±16,67	99,88
<i>F. pinicola</i>	11,46±1,56	11,06±2,18	4,26±1,42	1,38±0,37	9,48±1,23	4,58±1,07	111,44±20,66	153,66
<i>Ph. pini</i>	2,62±0,75	12,53±3,46	6,31±3,64	0,89±0,15	4,54±2,46	2,55±0,43	115,45±2,30	144,89
\bar{x}	7,59	13,32	6,98	1,16	8,17	3,34	62,77	102,57

Примечание. Здесь и далее: \bar{x} – среднее арифметическое содержание элементов в плодовых телах всех ксилотрофов; Σ ТМ – сумма всех тяжелых металлов.

Note. Hereinafter: \bar{x} is the simple mean of chemical abundance in the fruiting bodies of all xylophores; Σ ТМ is the sum of all heavy metals.

Анализ данных табл. 1 показывает, что наибольшее суммарное содержание всех ТМ наблюдается в плодовых телах *Fomitopsis pinicola* (153,66 мг/кг), а наименьшее – в телах *Phellinus tremulae* (47,37 мг/кг). Больше всего в ксилотрофах содержится Fe (в среднем на один обезличенный вид гриба) – 102,47 мг/кг, меньше всего Cd – 1,16 мг/кг. Поэлементное соотношение в представителях различных видов ксилотрофов варьирует в широких пределах.

На рис. 2 наглядно представлены максимальные количественные характеристики содержания Fe в плодовых телах ксилотрофов, которые можно выразить через следующий ряд:

Phellinus pini > *Fomitopsis pinicola* > *Coriolus versicolor* > *Phellinus robustus* > *Phellinus tremulae*.

Следует отметить минимальные концентрации Co и Cd в плодовых телах всех исследуемых представителей группы ксилотрофов по сравнению с остальными исследуемыми металлами. Их можно выразить через следующие ряды:

– Co: *Fomitopsis pinicola* > *Coriolus versicolor* > *Phellinus tremulae* > *Phellinus pini* > *Phellinus robustus*;

– Cd: *Phellinus robustus* > *Fomitopsis pinicola* > *Phellinus tremulae* > *Coriolus versicolor* > *Phellinus pini*.

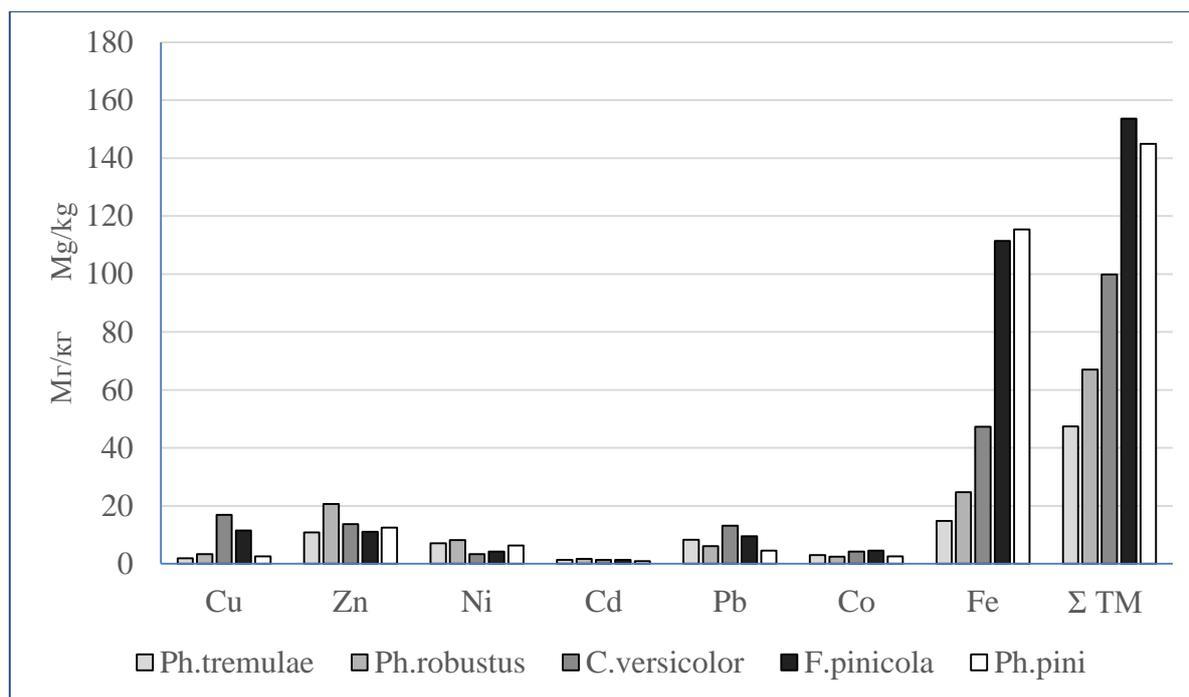


Рис. 2. Среднее содержание ТМ (мг/кг) в плодовых телах ксилотрофов

Fig. 2. Mean HM content (mg/kg) in fruiting bodies of xylotrophs

По содержанию остальных элементов доминантные ксилотрофы образуют нижеприведенные последовательности:

– Pb: *Coriolus versicolor* > *Fomitopsis pinicola* > *Phellinus tremulae* > *Phellinus robustus* > *Phellinus pini*;

– Ni: *Phellinus robustus* > *Phellinus tremulae* > *Phellinus pini* > *Fomitopsis pinicola* > *Coriolus versicolor*;

– Zn: *Phellinus robustus* > *Coriolus versicolor* > *Phellinus pini* > *Fomitopsis pinicola* > *Phellinus tremulae*;

– Cu: *Coriolus versicolor* > *Fomitopsis pinicola* > *Phellinus robustus* > *Phellinus pini* > *Phellinus tremulae*.

Если рассматривать соотношение ТМ в каждом виде ксилотрофа, то получаем следующие цепочки:

– *Phellinus tremulae*: Fe > Zn > Pb > Ni > Co > Cu > Cd;

– *Phellinus robustus*: Fe > Zn > Ni > Pb > Cu > Co > Cd;

– *Phellinus pini*: Fe > Zn > Ni > Pb > Co > Cu > Cd;

– *Fomitopsis pinicola*: Fe > Cu > Zn > Pb > Co > Ni > Cd;

– *Coriolus versicolor*: Fe > Cu > Zn > Pb > Co > Ni > Cd.

Из пяти представителей ксилотрофов последовательность рядов совпадает только у *Fomitopsis pinicola* и *Coriolus versicolor*. Различия в накоплении элементов можно объяснить влиянием таких факторов, как тип субстрата (порода дерева), видовые отличия, трофическая специализация макромицетов.

Рассмотрим тенденции к аккумуляции ТМ в разных экологических группах макромицетов. Результаты анализа (табл. 2) показывают, что абсолютным концентратором являются микоризообразователи, т.е. содержание каждого исследуемого элемента в представителях рода *Russula* spp. достоверно ($t < 0,05$) выше по сравнению с другими. Исключение составляет Cu, максимальное количество которого содержится в ксилотрофах ($12,34 \pm 2,36$ мг/кг), которые в то же время меньше всего накапливают Cd.

Таблица 2
Table 2Содержание ТМ в основных экологических группах макромицетов
HM content in the main ecological groups of macromycetes

Экологические группы Ecological groups	Содержание ТМ, мг/кг HM content, mg/ kg							
	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Co	Fe	Σ ТМ Σ HM
Ксилотрофы Xylotrophs	12,34±2,36	8,88±2,42	5,26±2,03	0,76±0,54	6,76±1,95	2,76±0,32	117,98±20,76	154,74
Гумусовые сапротрофы Humus saprotrophs	3,08±0,14	11,56±0,21	6,74±0,42	1,53±0,05	4,47±0,06	2,80±0,09	169,10±0,80	199,28
Микоризообразователи Mycorrhizae-forming fungus	11,89±0,25	16,33±0,16	13,48±0,33	1,60±0,02	8,51±0,08	3,56±0,05	265,54±0,84	320,91

Рассматривая соотношение ТМ по средним показателям в каждой группе, можно отметить максимальную концентрацию Fe и минимальную Cd во всех трех экологических группах макромицетов. Остальные металлы содержатся в разных пропорциях. В ксилотрофах накопление исследуемых ТМ представлено следующим рядом: Fe > Cu > Zn > Pb > Ni > Co > Cd; в гумусовых сапротрофах – Fe > Zn > Ni > Pb > Cu > Co > Cd; в микоризообразователях – Fe > Zn > Ni > Cu > Pb > Co > Cd.

Если сравнивать содержание каждого элемента-загрязнителя в экологических группах макромицетов, получим следующие последовательности:

- Co: микоризообразователи > ксилотрофы > гумусовые сапротрофы;
- Cd: микоризообразователи > гумусовые сапротрофы > ксилотрофы;
- Pb: микоризообразователи > ксилотрофы > гумусовые сапротрофы;
- Ni: микоризообразователи > гумусовые сапротрофы > ксилотрофы;
- Zn: микоризообразователи > ксилотрофы > гумусовые сапротрофы;
- Cu: ксилотрофы > микоризообразователи > гумусовые сапротрофы;
- Fe: микоризообразователи > гумусовые сапротрофы > ксилотрофы.

Выявленные в ходе исследования доминантные макромицеты-ксилотрофы относятся по эволюционному положению к различным группам: облигатный сапротроф – *Coriolus versicolor*; факультативный паразит – *Fomitopsis pinicola*; факультативные сапротрофы – *Phellinus robustus*, *Phellinus tremulae*, *Phellinus pini*, поэтому представлял интерес анализ содержания ТМ в представителях каждой из групп. Результаты представлены в табл. 3.

Наибольшее среднее суммарное содержание ТМ зафиксировано в представителях группы облигатных сапротрофов (99,88 мг/кг), наименьшее – в факультативных паразитах (49,70 мг/кг). Облигатные сапротрофы в максимальных количествах, по сравнению с другими группами, накапливают Cu, Cd, Pb. Концентрации Ni и Co в факультативных паразитах чуть выше, чем в факультативных и облигатных сапротрофах. Больше всего факультативные сапротрофы содержат Fe (51,75 мг/кг). Следует отметить максимальную концентрацию Fe и минимальную Cd для плодовых тел грибов всех исследуемых эволюционных групп. Соотношение остальных металлов в каждой группе меняется. Так, концентрации ТМ в группах образуют следующие ряды:

- факультативные сапротрофы: Zn > Ni > Pb > Cu > Co;

- факультативные паразиты: Cu > Zn > Pb
> Ni > Co;

- облигатные сапротрофы: Cu > Zn > Pb >
Co > Ni.

Таблица 3
Table 3

Среднее содержание ТМ в хилотрофах разных эволюционных групп
Mean HM content in xylotrophs of different evolutionary groups

Виды грибов Fungi species	Содержание ТМ, мг/ кг HM content, mg/ kg							
	Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Co	Fe	Σ ТМ Σ HM
Факультативные сапротрофы Facultative saprotrophs								
<i>Phellinus pini</i>	3,34±0,36	20,62±0,97	8,18±0,93	1,68±0,17	6,06±0,45	2,43±0,11	24,75±0,71	67,07
<i>Phellinus tremulae</i>	1,93±0,09	10,84±0,95	7,09±0,83	1,35±0,13	8,33±0,47	2,98±0,11	14,85±1,17	47,37
<i>Phellinus robustus</i>	2,62±0,14	12,53±0,63	6,31±0,66	0,89±0,03	5,67±0,45	2,65±0,08	115,64±0,42	144,89
\bar{x}	2,63	14,66	7,19	1,31	6,69	2,69	51,75	86,44
Факультативный паразит Facultative parasite								
<i>Fomitopsis pinicola</i>	4,52±0,19	8,07±0,17	9,55±0,47	1,07±0,08	7,21±0,35	4,24±0,07	15,04±1,02	49,70
Облигатный сапротроф Obligate saprotroph								
<i>Coriolus versicolor</i>	16,86±0,86	13,68±0,23	3,32±0,71	1,32±0,07	13,16±0,26	4,18±0,08	47,36±3,04	99,88

Таким образом, наиболее сходны по распределению металлов облигатные сапротрофы и факультативные паразиты. Данный факт можно объяснить тем, что факультативные паразиты ведут в основном сапротрофный образ жизни, лишь изредка поселяясь на здоровых деревьях. В нашем исследовании представитель факультативных паразитов (*Fomitopsis pinicola*) чаще всего встречался на сухостойных или отмерших деревьях. Кроме того, факультативные паразиты, как и облигатные сапротрофы, являются в большинстве своем полифагами, т.е. могут произрастать на различных видах субстрата (породах деревьев).

Наследующем этапе исследования нами было изучено содержание ТМ в макромицетах, произрастающих на территориях с различной антропогенной нагрузкой (табл. 4).

Полученные данные свидетельствуют о том, что по мере удаления от города участка произрастания макромицетов суммарное содержание ТМ в плодовых телах как *Phellinus robustus*, так и *Russula* spp. достоверно уменьшается ($t < 0,05$).

При определении количества тяжелых металлов в плодовых телах макромицетов прослеживается корреляция с их содержанием в окружающей среде. Оценку интенсивности поглощения химических элементов удобно осуществлять с помощью предложенного в 1956 г. Б.Б. Полюновым коэффициента биологического поглощения (Кп), отражающего отношение концентрации элемента в плодовом теле гриба к концентрации того же элемента в субстрате, на котором произрастает гриб.

Таблица 4
Table 4Содержание ТМ в макромицетах на участках с различным уровнем техногенной нагрузки
Content of TM in macromycetes in areas with different levels of anthropogenic load

Уровень техногенной нагрузки Level of anthropogenic load	Название пробы Sample	Содержание ТМ, мг/кг HM content, mg/ kg							
		Cu	Zn	Ni	Cd	Pb	Co	Fe	Σ ТМ Σ HM
Высокий High	<i>Ph. robustus</i>	3,04±0,26	10,87±0,32	4,34±0,14	1,05±0,09	5,36±0,11	3,00±0,18	116,77±10,27	144,43
	Древесина Wood	12,80	25,10	15,30	4,80	28,10	10,00	156,10	252,20
	Кп Ка	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,7	0,6
Средний Medium	<i>Ph. robustus</i>	2,54±0,11	8,40±0,68	3,06±0,26	1,04±0,11	2,06±0,16	1,95±0,25	115,32±11,31	134,37
	Древесина Wood	6,50	13,20	4,10	1,75	11,90	6,93	114,20	158,58
	Кп Ка	0,4	0,6	0,7	0,6	0,2	0,3	1,0	0,8
Низкий Low	<i>Ph. robustus</i>	10,42±0,81	7,80±0,52	2,44±0,06	0,96±0,03	7,61±0,01	4,52±0,35	96,47±1,32	130,22
	Древесина Wood	3,80	5,40	3,10	1,10	5,70	1,00	39,60	59,70
	Кп Ка	2,7	1,4	0,8	0,9	1,3	4,5	2,4	2,2
Высокий High	<i>Russula spp.</i>	21,86±0,15	28,32±0,31	21,12±0,33	2,39±0,16	29,89±0,41	13,73±0,32	372,06±15,32	489,37
	Почва Soil	12,80	25,10	15,30	4,80	28,10	10,00	156,10	252,20
	Кп Ка	1,7	1,1	1,6	1,2	1,1	1,4	2,4	1,9
Средний Medium	<i>Russula spp.</i>	12,69±0,31	17,00±0,41	12,93±0,33	1,95±0,07	13,87±0,08	8,64±0,09	315,08±8,57	382,16
	Почва Soil	6,50	13,20	4,10	1,75	11,90	6,93	114,20	158,58
	Кп Ка	2,0	1,3	3,2	1,1	1,2	2,0	2,8	2,4
Низкий Low	<i>Russula spp.</i>	19,04±0,13	22,07±0,24	11,15±0,14	1,10±0,08	9,02±0,12	3,26±0,11	301,2±18,32	366,84
	Почва Soil	3,80	5,40	3,10	1,10	5,70	1,00	39,60	59,70
	Кп Ка	5,0	4,1	4,0	1,0	1,6	3,3	7,6	6,1

Как показано в табл. 4, при общем уменьшении суммарного содержания ТМ в макромицетах и почвах по мере удаления от техногенных источников Кп увеличивается: для *Phellinus robustus* – с 0,6 до 2,2, для *Rus-*

sula spp. – с 1,9 до 6,1. Анализ поэлементного аккумулярования показал, что представители *Russula spp.* интенсивнее накапливают все ТМ. *Phellinus robustus* хорошо аккумулирует ТМ на территории с низким уровнем

техногенной нагрузки (в Кузоватовском лесхозе). Значительные различия Кп в почвенных и дереворазрушающих грибах могут быть обусловлены их структурой (трутовые грибы более плотные, деревянистые) и типом субстрата: *Phellinus robustus* произрастает на дереве, в котором происходит перераспределение ТМ, поступающих из почвы, по различ-

ным органам; *Russula* spp. – на почве, которая является неким «депо» для ТМ.

Перераспределение химических элементов в компонентах поликонцентральной модели «почва – дерево – трутовик», где компонент «почва» меняется, а компоненты «дерево» и «трутовик» остаются неизменными, представлено в табл. 5.

Таблица 5
Table 5

Содержание ТМ в звеньях экологической цепи «почва – дерево – гриб»
HM content in the ecological chain soil-wood-fungi

Уровень техногенной нагрузки Level of anthropogenic load	Название пробы Sample	Содержание ТМ, мг/кг HM content, mg/ kg							
		Cu	Zn	Cu	Cd	Cu	Co	Cu	Σ ТМ
Высокий High	Почва Soil	14,45±1,03	17,11±0,76	13,79±0,42	1,30±0,41	6,17±0,89	1,02±0,12	239,12±2,75	292,66
	Древесина Wood	2,10±0,43	7,68±0,84	3,98±0,31	0,54±0,05	3,78±1,32	1,01±0,23	122,31±3,71	141,40
	<i>Phellinus robustus</i>	3,04±0,26	10,87±0,32	4,34±0,14	1,05±0,09	5,36±0,11	3,00±0,18	116,77±10,27	144,43
Средний Medium	Почва Soil	13,87±1,07	15,46±0,53	13,16±0,92	1,10±0,20	5,75±1,10	0,98±0,41	219,64±8,34	269,96
	Древесина Wood	3,82±0,19	11,92±0,83	2,81±0,71	0,85±0,32	4,95±1,42	0,96±0,13	111,01±2,14	136,32
	<i>Phellinus robustus</i>	3,05±0,23	12,34±0,21	2,99±0,23	0,87±0,08	3,98±0,12	2,54±0,32	115,61±3,61	141,38
Низкий Low	Почва Soil	3,02±1,07	4,78±1,24	3,42±1,39	1,09±0,26	3,82±1,18	1,01±0,09	121,74±2,04	138,88
	Древесина Wood	3,34±0,36	5,88±0,42	3,26±0,03	1,06±0,04	2,76±0,05	1,16±0,02	107,98±5,76	125,44
	<i>Phellinus robustus</i>	2,54±0,11	8,40±0,68	3,06±0,26	1,04±0,11	2,06±0,16	1,95±0,25	115,32±11,31	134,37

Анализ табл. 5 показывает, что суммарное содержание ТМ в почвах достоверно выше, чем в других компонентах консорции – древесине дуба и плодовых телах *Phellinus robustus*. Результаты проведенных исследований подтверждают литературные данные [6, 7] о том, что ТМ в меньшей степени аккумулируются в древесине. При этом следует отметить, что суммарное содержание ТМ в плодовых телах *Phellinus robustus* достоверно выше, чем в древесине дуба. Следовательно, суммарное содержание ТМ достоверно увеличивается по мере продвижения в пищевой цепи «дерево – трутовик» от низшего звена продуцента, в ка-

честве которого выступает дерево, к высшему – консументу, которым в нашем случае является гриб *Phellinus robustus*.

Выводы:

1. Доминирующими представителями микобиоты на исследуемых участках с преобладанием *Pinus silvestris* L., *Quercus robur* L. и *Populus tremula* L. вне зависимости от фактора антропогенного влияния стали шляпочные базидиомицеты из рода *Russula* spp., представители рода *Agaricus* spp., шесть грибов-ксилотрофов: *Phellinus pini* (Thore ex Fr.) Pilat. и *Fomitopsis pinicola* (Fr.) Karst. – на сосне, *Cortolus versicolor* (Fr.) Quel. и *Phellinus robustus*

(Karst.) Bourd. et Galz. – на дубе, *Phellinus tremulae* (Boriss.) Bond. et Boriss. и *Coriolus versicolor* (Fr.) Quel. – на осине.

2. Абсолютными концентраторами ТМ среди экологических групп макромицетов являются микоризообразующие грибы.

3. Содержание ТМ в грибах уменьшается по мере продвижения от эволюционно более старых (облигатных сапротрофов) к эволюционно более молодым (облигатным паразитам).

4. Аккумуляция ТМ в почвенных грибах при усилении воздействия техногенного фак-

тора происходит интенсивнее, чем в дереворазрушающих, что объясняется типом субстрата, на котором произрастают грибы.

5. В пищевой цепи «древесина – трутовик» концентрация ТМ увеличивается по мере продвижения к высшему трофическому звену консументов.

Макромицеты различных эколого-трофических групп могут применяться в биоиндикации антропогенных загрязнений лесных экосистем естественных биоценозов и урбанизированных территорий.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования: Чураков Б.П., Зырянова У.П., Сапонов Б.С., Гусарова В.С.

Литературный поиск, участие в исследовании, обработка материала: Зырянова У.П., Сапонов Б.С., Гусарова В.С.

Статистическая обработка данных: Чураков Б.П., Зырянова У.П.

Анализ и интерпретация данных: Чураков Б.П., Зырянова У.П.

Написание и редактирование текста: Чураков Б.П., Зырянова У.П., Сапонов Б.С., Гусарова В.С.

Литература

1. Арефьев С.П. Специализация дереворазрушающих грибов в связи с жизненным состоянием субстрата. Проблемы лесной фитопатологии и микологии: материалы 5-й междунар. конф.. М.; 2002: 16–19.
2. Железнова О. С., Тобратов С.А. Роль растительности в регулировании потоков тяжелых металлов в подтаежных лесных экосистемах центра Восточно-Европейской равнины. Лесоведение. 2021; 1: 11–27.
3. Myslyva T.N., Mikhalchuk N.V., Bilyavskiy Yu.A., Nadtochiy P.P. The accumulation of heavy metals by macromycetes in Brest Region of the Republic of Belarus. Mycology and Phytopathology. 2019; 53 (4): 197–209.
4. Гордеева И.В. Исследование влияния загрязнения субстрата тяжелыми металлами на размеры плодовых тел грибов в городских экосистемах. Международный научно-исследовательский журнал. 2016; 10 (52). DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.52.153>.
5. Широких А.А., Широких И.Г. Накопление тяжелых металлов ксилотрофными базидиальными грибами в городских экосистемах. Микология и фитопатология. 2010; 44 (4): 359–366.
6. Красников А.В., Селихова В.С., Красникова Е.С. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культивируемыми грибами (обзор). Инновации и продовольственная безопасность. 2021; 1: 61–66.
7. Медведев А.Г. Трутовые грибы как индикаторы изменений лесных экосистем Тверской области под воздействием антропогенной нагрузки: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Москва; 2005. 17.
8. Цветнова О.Б., Шатрова Н.М., Щеглов А.И. Накопление радионуклидов и тяжелых металлов грибным комплексом лесных экосистем. Научные труды института ядерных исследований. 2001; 3 (5): 171–176.
9. Чураков Б.П., Лисов Е.С., Евсеева Н.А. Микоиндикация загрязнения лесных экосистем тяжелыми металлами. Микология и фитопатология. 2000; 34 (2): 57–61.
10. Чураков Б.П., Пантелеев С.В., Зырянова У.П., Морозова Н.В. Тяжелые металлы в представителях микобиоты различных эволюционных групп. Микология и фитопатология. 2004; 38 (2): 68–77.
11. Васин Д.В. Содержание тяжелых металлов в почвах разных агроклиматических зон Ульяновской области. Сравнительная характеристика распределения тяжелых металлов в почвах Ульяновской области и в соседних регионах (на примере Самарской области). Современные проблемы науки и образования. 2013; 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8332> (дата обращения: 15.08.2024).

12. Попыванов Д.В., Широких А.А. Видовой состав и способность агарикомицетов к аккумуляции тяжелых металлов в условиях урбозкосистемы. Микология и фитопатология. 2021; 55 (2): 138–147.
13. Bargagli R. Trace Elements in Terrestrial Plants. Berlin: Springer-Verlag Berlin; 1998: 153–177.
14. Чураков Б.П., Митрофанова Н.А. Анализ видового состава и структуры микобиоты лесов Ульяновской области. Проблемы экологии и охраны природы. Пути их решения: материалы II Всероссийской научно-практической конференции. Ульяновск; 2004: 201–208.
15. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Ульяновской области в 2022 году». Ульяновск; 2023. URL: <https://cloud.mail.ru/public/igHL/8wZa2z3k9> (дата обращения: 15.08.2024).
16. Robert V., Stegehuis G., Stalpers J. The MycoBank engine and related databases. URL: <https://www.mycobank.org/> (дата обращения: 01.08.2024).
17. Бондарцева М.А. Определитель грибов России: Порядок Arhylophorales. Вып. 2. СПб.: Наука; 1998. 391.
18. Бондарцева М.А., Пармасто Э.Х. Определитель грибов России: Порядок Arhylophorales. Вып. 1. Ленинград: Наука; 1986. 192.

Поступила в редакцию 09.10.2024; принята 11.02.2025.

Авторский коллектив

Чураков Борис Петрович – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой лесного хозяйства, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет». 432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42; e-mail: churakovbp@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3278-7744>.

Зырянова Ульяна Петровна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экономики и государственного управления, Ульяновский филиал ФГБОУ ВО «Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ». 432011, Россия, г. Ульяновск, ул. Корюкина, 20; e-mail: ulyana1503@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0820-2961>.

Сапонов Борис Сергеевич – аспирант кафедры лесного хозяйства, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет». 432017, Россия, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42; e-mail: qwerqaz100@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-5224-9472>.

Гусарова Вера Сергеевна – кандидат биологических наук, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет». 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32; e-mail: verik2@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-2296-1355>.

Образец цитирования

Чураков Б.П., Зырянова У.П., Сапонов Б.С., Гусарова В.С. Макромицеты как индикаторы антропогенных загрязнений тяжелыми металлами лесных экосистем. Ульяновский медико-биологический журнал. 2025; 1: 135–148. DOI: 10.34014/2227-1848-2025-1-135-148.

MACROMYCETES AS INDICATORS OF ANTHROPOGENIC POLLUTION OF FOREST ECOSYSTEMS WITH HEAVY METALS

B.P. Churakov¹, U.P. Zyryanova², B.S. Saponov¹, V.S. Gusarova³

¹ Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia;

² Presidential Academy, Ulyanovsk branch, Ulyanovsk, Russia;

³ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

Mycobiota is a group of living organisms characterized not only by high resistance to anthropogenic factors, but also by the ability to accumulate such substances as heavy metals. This property allows the use of certain macromycetes in environmental monitoring of forest ecosystems.

Objective. The aim of the study is to determine the influence of abiotic and anthropogenic factors on the accumulation of heavy metals by fruiting bodies of macromycetes. It can help to assess the forest ecosystem pollution by pollutants in the Middle Volga region.

Materials and Methods. Fruiting bodies of dominant macromycetes (soil and wood-destroying fungi) were studied in forest ecosystems with different levels of anthropogenic load. Lead, nickel, copper, cadmium, zinc, cobalt and iron content was determined. The sampling areas were the park of Ulyanovsk city "Vinovskaya grove", a site in the Ulyanovsk forestry (2 km from Ulyanovsk) and a site in the Kuzovatovo forestry (100 km from Ulyanovsk, control). The sample areas were of a similar forest site type.

Results. It was revealed that among ecological groups of macromycetes, the sorption capacity in relation to the total amount of heavy metals is most clearly expressed in mycorrhiza-forming fungi. In the evolutionary development, a decrease in the content of pollutants was observed as we move from obligate saprotrophs to obligate parasites, i.e. from evolutionarily old to evolutionarily young species. Under the increasing impact of the anthropogenic factor, HM Accumulation in soil fungi is more intensive than in wood-destroying ones. It is explained by the type of substrate on which the fungi grow.

In the ecological chain "soil - wood - tinder fungus" an increase in the content of heavy metals is observed as we move from saprotrophs to the highest trophic link of consumers.

Key words: macromycetes, heavy metals, abiotic factors, anthropogenic factors, forest ecosystems.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Author contributions

Research concept and design: Churakov B.P., Zyryanova U.P., Saponov B.S., Gusarova V.S.

Literature search, participation in the study, data processing: Zyryanova U.P., Saponov B.S., Gusarova V.S.

Statistical data processing: Churakov B.P., Zyryanova U.P.

Data analysis and interpretation: Churakov B.P., Zyryanova U.P.

Text writing and editing: Churakov B.P., Zyryanova U.P., Saponov B.S., Gusarova V.S.

References

1. Aref'ev S.P. Spetsializatsiya derevorazrushayushchikh gribov v svyazi s zhiznennym sostoyaniem substrata. [Specialization of wood-destroying fungi preconditioned by the vital state of the substrate]. *Problemy lesnoy fitopatologii i mikologii: materialy V mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Problems of forest phytopathology and mycology: Proceedings of the international science conference]. Moscow; 2002: 16–19 (in Russian).
2. Zheleznova O. S., Tokratov S.A. Rol' rastitel'nosti v regulirovaniy potokov tyazhelykh metallov v podtaezhnykh lesnykh ekosistemakh tsentra Vostochno-Evropeyskoy ravniny [The vegetation's role in heavy metal fluxes regulation in sub-taiga forest ecosystems of the center of the East European plain]. *Lesovedenie*. 2021; 1: 11–27 (in Russian).
3. Myslyva T.N., Mikhanchuk N.V., Bilyavskiy Yu.A., Nadtochiy P.P. The accumulation of heavy metals by macromycetes in Brest Region of the Republic of Belarus. *Mycology and Phytopathology*. 2019; 53 (4): 197–209.
4. Gordeeva I.V. Issledovanie vliyaniya zagryazneniya substrata tyazhelymi metallami na razmery plodovyykh tel gribov v gorodskikh ekosistemakh [Study of substrate heavy metals pollution effect on mushroom fruiting bodies of in urban ecosystems]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2016; 10 (52). DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.52.153> (in Russian).
5. Shirokikh A.A., Shirokikh I.G. Nakoplenie tyazhelykh metallov ksilotrofnymi bazidial'nymi gribami v gorodskikh ekosistemakh [Accumulation of heavy metals by xylotrophic basidiomycetes in urban ecosystems]. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2010; 44 (4): 359–366 (in Russian).
6. Krasnikov A.V., Selikhova V.S., Krasnikova E.S. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov dikorastushchimi i kul'tiviruemyimi gribami (obzor) [Accumulation of heavy metals by wild and cultivated mushrooms (review)]. *Innovatsii i prodovol'stvennaya bezopasnost'*. 2021; 1: 61–66 (in Russian).
7. Medvedev A.G. *Trutovye griby kak indikator izmeneniy lesnykh ekosistem Tverskoy oblasti pod vozdeystviem antropogennoy nagruzki* [Tinder fungi as indicators of changes in forest ecosystems of the Tver region under anthropogenic load]: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk: 03.00.16. Moscow; 2005. 17 (in Russian).
8. Tsvetnova O.B., Shatrova N.M., Shcheglov A.I. Nakoplenie radionuklidov i tyazhelykh metallov gribnym kompleksom lesnykh ekosistem [Accumulation of radionuclides and heavy metals by the fungal complex of forest ecosystems]. *Nauchnye trudy instituta yadernykh issledovaniy*. 2001; 3 (5): 171–176 (in Russian).

9. Churakov B.P., Lisov E.S., Evseeva N.A. Mikoindikatsiya zagryazneniya lesnykh ekosistem tyazhelymi metallami [Mycointication of forest ecosystem pollution with heavy metals]. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2000; 34 (2): 57–61 (in Russian).
10. Churakov B.P., Panteleev S.V., Zyryanova U.P., Morozova N.V. Tyazhelye metally v predstavityakh mikobioty razlichnykh evolyutsionnykh grupp [Heavy metals in mycobiota representatives of different evolutionary groups]. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2004; 38 (2): 68–77 (in Russian).
11. Vasin D.V. Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochvakh raznykh agroklimaticheskikh zon Ul'yanovskoy oblasti. Sravnitel'naya kharakteristika raspredeleniya tyazhelykh metallov v pochvakh Ul'yanovskoy oblasti i v sosednikh regionakh (na primere Samarskoy oblasti) [Heavy metal content in soils of different agroclimatic zones of the Ulyanovsk region. Comparative characteristics of heavy metal distribution of in soils of the Ulyanovsk and Samara regions]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013; 1. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8332> (assessed: August 15, 2024) (in Russian).
12. Popyvanov D.V., Shirokikh A.A. Vidovoy sostav i sposobnost' agarikomitsetov k akkumulyatsii tyazhelykh metallov v usloviyakh urboekosistemy [Species composition and agaricomycetes ability to accumulate heavy metals in urban ecosystems]. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2021; 55 (2): 138–147 (in Russian).
13. Bargagli R. *Trace Elements in Terrestrial Plants*. Berlin: Springer-Verlag Berlin; 1998: 153–177.
14. Churakov B.P., Mitrofanova N.A. Analiz vidovogo sostava i struktury mikobioty lesov Ul'yanovskoy oblasti [Analysis of species composition and forests mycobiota structure in the Ulyanovsk region]. *Problemy ekologii i okhrany prirody. Puti ikh resheniya: materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecology and nature conservation. Ways to solve problems: Proceedings of the 2nd All-Russian science-to-practice conference]. Ul'yanovsk; 2004: 201–208 (in Russian).
15. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii okruzhayushchey sredy Ul'yanovskoy oblasti v 2022 godu»* [Ulyanovsk region national environmental report, 2022]. Ul'yanovsk; 2023. Available at: <https://cloud.mail.ru/public/igHL/8wZa2z3k9> (accessed: August 15, 2024) (in Russian).
16. Robert V., Stegehuis G., Stalpers J. *The MycoBank engine and related databases*. Available at: <https://www.mycobank.org/> (accessed: August 01, 2024).
17. Bondartseva M.A. *Opredelitel' gribov Rossii: Poryadok Aphylophorales* [Mushroom Guide and identifier in Russia: Aphylophorales]. Vyp. 2. SPb.: Nauka; 1998. 391 (in Russian).
18. Bondartseva M.A., Parmasto E.Kh. *Opredelitel' gribov Rossii: Poryadok Aphylophorales* [Mushroom Guide and identifier in Russia: Aphylophorales]. Vyp. 1. Leningrad: Nauka; 1986. 192 (in Russian).

Received October 09, 2024; accepted February 11, 2025.

Information about the authors

Churakov Boris Petrovich, Doctor of Sciences (Biology), Professor, Head of the Chair of Forestry, Ulyanovsk State University. 432017, Russia, Ulyanovsk, L. Tolstoy St., 42; e-mail: churakovbp@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3278-7744>.

Zyryanova Ulyana Petrovna, Candidate of Sciences (Biology), Associate Professor, Chair of Economics and Public Administration, Presidential Academy, Ulyanovsk branch. 432011, Russia, Ulyanovsk, Koryukin St., 20; e-mail: ulyana1503@mail.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0820-2961>.

Saponov Boris Sergeevich, Postgraduate student, Chair of Forestry, Ulyanovsk State University. 432017, Russia, Ulyanovsk, L. Tolstoy St., 42; e-mail: qwerqaz100@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-5224-9472>.

Gusarova Vera Sergeevna, Candidate of Sciences (Biology), Ulyanovsk State Technical University. 432027, Russia, Ulyanovsk, Severnyy Venets St., 32; e-mail: verik2@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-2296-1355>.

For citation

Churakov B.P., Zyryanova U.P., Saponov B.S., Gusarova V.S. Makromitsety kak indikatory antropogennykh zagryazneniy tyazhelymi metallami lesnykh ekosistem [Macromycetes as indicators of anthropogenic pollution of forest ecosystems with heavy metals]. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*. 2025; 1: 135–148. DOI: 10.34014/2227-1848-2025-1-135-148 (in Russian).