

УДК 582:581.5:581.93

М. А. Сафонов**А. В. Шамраев****Ю. В. Дволучанская****Варьирование содержания тяжелых металлов в базидиомах ксилотрофных грибов в зависимости от их видовой принадлежности и свойств субстрата в условиях Южного Приуралья**

Приводятся данные по накоплению цинка, меди, железа, марганца плодовыми телами некоторых трутовых грибов в низкогорных лесах Южного Приуралья. Анализируются видовые различия суммарного содержания и накопления отдельных тяжелых металлов. На основе анализа корреляционных связей делается вывод о незначительном влиянии содержания тяжелых металлов в древесине на их содержание в грибах и в качестве основного фактора аккумуляции рассматриваются биологические особенности видов грибов.

Ключевые слова: тяжелые металлы, цинк, марганец, медь, железо, аккумуляция, трутовые грибы, *Fomes fomentarius*, *Fomitopsis pinicola*, лесные экосистемы, Южное Приуралье.

Тяжелые металлы относятся к одним из наиболее токсичных поллютантов, оказывающих существенное влияние на онтогенез, репродуктивные функции и функционирование разных групп живых организмов. Объективная оценка аккумуляции тяжелых металлов на разных трофических уровнях экосистем и влияния загрязнения на компоненты экосистем невозможна без проведения развернутых исследований содержания этих элементов в разных частях трофических цепей разных типов экосистем и определения закономерностей их миграции и трансформации.

Для оценки поведения тяжелых металлов в лесных экосистемах требуются исследования их содержания не только в почве, листьях, древесине, но и в грибах, которые утилизируют растительные остатки, переводя их в формы, более доступные для других организмов.

Говоря о накоплении тяжелых металлов и других элементов живыми организмами, следует учитывать важный аспект проблемы: многие элементы необходимы для жизнедеятельности организмов и могут накапливаться и расходоваться; в этом случае наличие поллютантов не следует расценивать исключительно с отрицательной стороны. В отношении грибов необходимо учитывать и еще одну сторону вопроса: традиционно содержание элементов определяется в плодовых телах грибов, а не во всем теле гриба, из-за чего говорить об абсолютных величинах накопления тяжелых металлов грибами не совсем корректно.

В любом случае на процессы аккумуляции тяжелых металлов организмами, в том числе и грибами, влияет множество факторов: источники, количество и формы поступающих элементов; присутствие тяжелых металлов на предыдущем трофическом уровне; видовая принадлежность изучаемого организма-накопителя; природные условия конкретного локалитета и т.п.

Для полного сравнительного анализа всех вышеуказанных параметров нужны объемные исследования. В нашем исследовании, проведенном в 2012 году, мы сделали попытку проанализировать накопление тяжелых металлов плодовыми телами грибов в зависимости от содержания элементов в субстрате, видовой принадлежности субстрата и видовых особенностей грибов в условиях минимальной техногенной нагрузки, когда основным источником поступления элементов становятся организмы предыдущего трофического

© Сафонов М. А., Шамраев А. В., Дволучанская Ю. В., 2013

уровня. Цель нашей работы — изучение специфики миграции ряда тяжелых металлов из древесины разных родов древесных растений в грибы разных видов и выявление закономерностей в этом процессе.

Полученные результаты послужат основой для изучения миграции и накопления тяжелых металлов в лесных экосистемах, подверженных техногенному загрязнению.

Материалы и методы. Районом исследования были участки низкогорных лесов разного состава в окрестностях с. Ташла Тюльганского района Оренбургской области. Отсутствие в непосредственной близости от изучаемых лесов крупных промышленных предприятий и автомобильных дорог позволило считать уровень техногенной нагрузки в этих лесах минимальным и сами леса условно неизменными.

Сбор образцов проводился в мелколиственных лесах Троицкого заказника. Преимущественно обследовались березняки разнотравные и разнотравно-снытевые, наиболее распространенные в регионе [10], черноольшаник крапивный, посадки березы разного возраста, посадки сосны разного возраста.

В качестве объектов исследований были выбраны трутовик настоящий — *Fomes fomentarius* (L.: Fr.) Fr., космополитный вид, широко распространенный в лесах Южного Приуралья и отмеченный на всех родах лиственных древесных растений в регионе [7, 8, 15], а также трутовик окаймленный — *Fomitopsis pinicola* (Sw.: Fr.) P. Karst. Выбор этих видов в качестве объектов исследований определяется рядом аргументов: их экологическая пластичность, обуславливающая широкое распространение в регионе и в мире; наличие крупных многолетних плодовых тел, повышающих их учетный потенциал [9].

Наиболее существенное различие между двумя выбранными видами — в их трофической специализации. Трутовик настоящий встречается на валежной древесине, сухостойных и ослабленных вегетирующих деревьях широкого спектра лиственных древесных растений, в то время как трутовик окаймленный способен разлагать древесину и лиственных и хвойных [14].

Оба вида относятся к трофической группе ксилотрофных (дереворазрушающих) базидиальных грибов, производящих деструкцию стойких лигниноцеллюлозных соединений за счет наличия комплекса специфических ферментов. По мнению ряда микологов, именно в плодовых телах ксилотрофных грибов накапливаются максимальные концентрации тяжелых металлов [12, 13], поступающих как в результате освоения ими массы древесины, содержащей тяжелые металлы, так и в результате сорбции их плодовыми телами из окружающей среды.

Для анализа содержания тяжелых металлов было отобрано и проанализировано 44 образца древесины березы, сосны и ольхи, на которых были обнаружены базидиомы трутовика настоящего или трутовика окаймленного, 14 плодовых тел трутовика настоящего и 30 плодовых тел трутовика окаймленного. Сбор образцов осуществляли в июне-сентябре 2012 г.

В качестве параметров исследований было выбрано содержание в образцах ряда тяжелых металлов: меди, железа, марганца и цинка. Выбор этих элементов для контроля обусловлен их достаточно широким распространением в региональных экосистемах, с одной стороны, и их важной ролью в функционировании грибов как компонентов белков и ферментов — с другой [1, 3]. Исследованиями установлено, что, в отличие от других экологических (трофических) групп грибов, ксилотрофные макромицеты склонны к аккумуляции металлов переменной валентности (железо, марганец и хром). Так, в базидиомах представителей данной группы макромицетов среднее содержание железа более чем в 2 раза превышает таковое в базидиомах представителей других эколого-трофических

групп [4]. В то же время значительная аккумуляция вышеупомянутых металлов отмечена и у других групп грибов, в частности у болетальных [2].

Анализ образцов плодовых тел грибов при оценке содержания тяжелых металлов осуществляли при помощи атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2А» согласно методическим указаниям (РД 52.18.289-90. Методика..., 1990). Химический анализ образцов на содержание тяжелых металлов путем анализа водной вытяжки из почвы и мокрым озолением для прочих образцов с последующим анализом на атомно-сорбционном спектрофотометре согласно следующим методикам: ГОСТ 30692-2000 — корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания меди, свинца, цинка и кадмия; методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Исследования проводились в аккредитованной лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области».

В дальнейшем проводился статистический и математический анализ данных с использованием MS Excel.

Результаты и обсуждение. Подобно прочим группам живых организмов древесные растения обладают разной способностью аккумулировать тяжелые металлы. Наши исследования показали, что по общему уровню накопления и содержанию отдельных тяжелых металлов изученные древесные растения (береза бородавчатая, ольха черная, сосна обыкновенная) существенно различаются. Максимальное количество учитываемых нами тяжелых металлов отмечено в древесине березы (в среднем — 150,9 мг/кг); за ней следует древесина сосны и замыкает ряд древесина ольхи, содержание в которой исследуемых элементов более чем в два раза меньше, чем в древесине березы.

По концентрациям отдельных элементов рассматриваемые растения различались еще более существенно (рис. 1). В древесине березы существенно преобладает содержание марганца, его количество также велико в древесине сосны; в древесине сосны и ольхи доминирует железо; по содержанию цинка также выделяется древесина березы. Сравнительно мало изменяется по древесным родам концентрация меди.

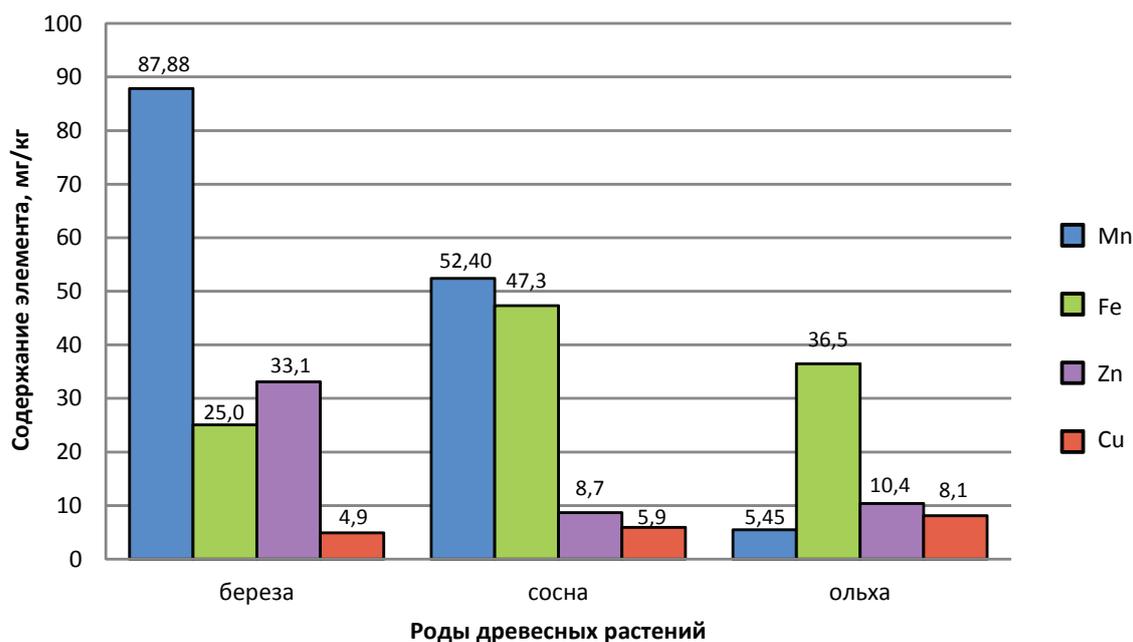


Рис. 1. Среднее содержание тяжелых металлов в древесных растениях района исследований, мг/кг

В целом корреляционный анализ показал сравнительно высокое сходство (0,677) концентраций тяжелых металлов в древесине березы и сосны. Возможно, это объясняется произрастанием березовых насаждений и сосновых посадок в сходных условиях, с близкими условиями увлажнения и почвенного покрова. Ольха черная отличается от них произрастанием в более увлажненных условиях и на других почвах, что вполне объясняет существенные различия тенденции в накоплении ее древесиной изучаемых тяжелых металлов.

Виды грибов также различаются по показателям накопления тяжелых металлов [6, 11]. Проведенными исследованиями установлено различие между трутовиком настоящим и трутовиком окаймленным как по общему содержанию тяжелых металлов в плодовых телах, так и по концентрациям отдельных элементов (табл. 1). Для обоих видов характерно высокое содержание в базидиомах цинка. Это может быть объяснено использованием цинка грибами для построения белков; важное значение этого элемента для формирования биомассы грибов доказано экспериментально [5].

Таблица 1

Среднее содержание ряда тяжелых металлов в плодовых телах грибов, мг/кг

Вид	Тяжелые металлы			
	Zn	Fe	Cu	Mn
<i>Fomes fomentarius</i>	42,78±3,61	29,67±2,90	12,21±1,12	8,38±1,63
<i>Fomitopsis pinicola</i>	40,31±3,54	49,78±6,07	4,97±1,28	5,13±1,30

В отношении меди и марганца отмечено заметно более высокое накопление в базидиомах *Fomes fomentarius*; содержание железа было выше в плодовых телах *Fomitopsis pinicola*. Вполне вероятно, что указанные видовые различия в аккумуляции тяжелых металлов могут быть обусловлены разным содержанием этих элементов в субстрате — древесине, откуда они и поступают в тех или иных количествах в плодовые тела грибов. Для минимизации этого фактора часть анализируемых образцов была собрана в одно и то же время в одной и той же местности и только с древесины березы.

Однако и эти плодовые тела разных видов грибов существенно различались по содержанию тяжелых металлов (рис. 2). Для обоих сравниваемых видов трутовиков отмечено максимальное содержание цинка и меди; по концентрации марганца и железа базидиомы трутовика настоящего в разы превосходили показатели базидиом трутовика окаймленного.

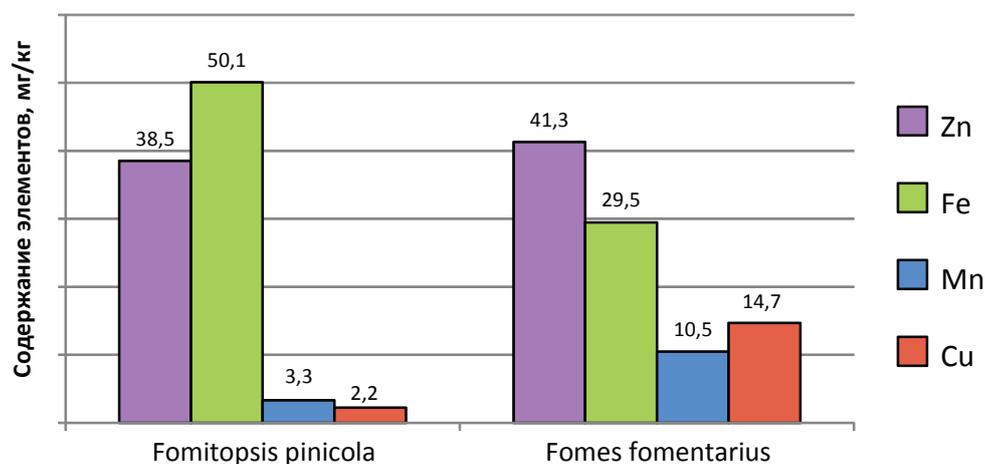


Рис. 2. Среднее содержание элементов в базидиомах разных видов грибов, собранных с березы

Анализ усредненных данных, безусловно, дает только самую общую картину видовых особенностей накопления тяжелых металлов базидиомами разных видов грибов, в которой теряется ряд частных результатов, имеющих зачастую большое значение для понимания закономерностей. Однако и графический анализ накопления элементов рядом образцов (рис. 3) показывает наличие двух достаточно четко отграниченных кластеров образцов по концентрации тяжелых металлов.

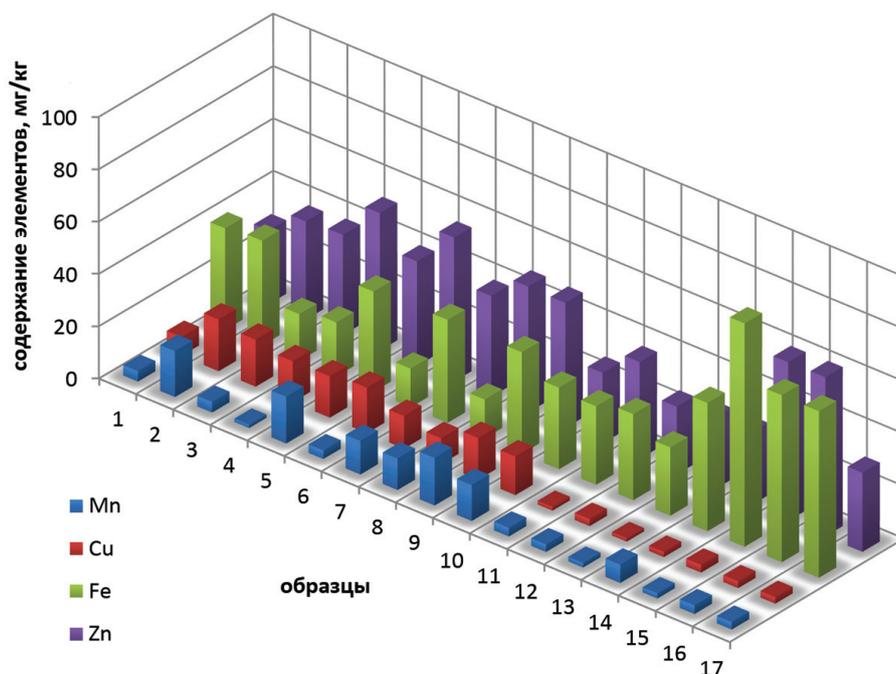


Рис. 3. Содержание тяжелых металлов в ряде изученных образцов базидиоми *Fomes fomentarius* (1—10) и *Fomitopsis pinicola* (11—17)

Возможной причиной различий в содержании тяжелых металлов в базидиомах изученных грибов может быть видовое различие в гарнитуре ферментов, включающих в свой состав атомы марганца, меди, железа. Соответственно композиция ферментов, образуемых тем или иным видом грибов, накладывает отпечаток на содержание этих элементов в плодовых телах.

Вместе с тем значительный интерес представляет вопрос о том, влияет ли на содержание тяжелых металлов в плодовых телах грибов (в отсутствие других явных источников поллютантов) содержание этих элементов в древесине деревьев, на которых развиваются эти грибы. С этой целью мы сравнили накопление тяжелых металлов в плодовых телах *Fomitopsis pinicola*, формирующихся на разных родах древесных растений, и проанализировали, насколько коррелируют между собой концентрации элементов в базидиомах и древесине.

Усредненные данные показывают, что по суммарному накоплению рассматриваемых тяжелых металлов первое место занимают плодовые тела трутовика окаймленного, формирующиеся на валежных и сухостойных стволах сосны (рис. 4). Соотношения концентраций прочих металлов в базидиомах, образующихся на разных родах древесных растений, существенно не различаются.

Корреляционный анализ показал значительное отрицательное сходство в содержании цинка и меди ($-0,768$), железа и марганца ($-0,684$) в базидиомах *Fomitopsis pinicola*. Значимая положительная корреляция ($0,809$) отмечена между концентрациями элемен-

тов в плодовых телах грибов и древесине ольхи. Между содержанием тяжелых металлов в плодовых телах, образующихся на субстратах разной видовой принадлежности, отмечена очень высокая корреляция (0,994—0,999).

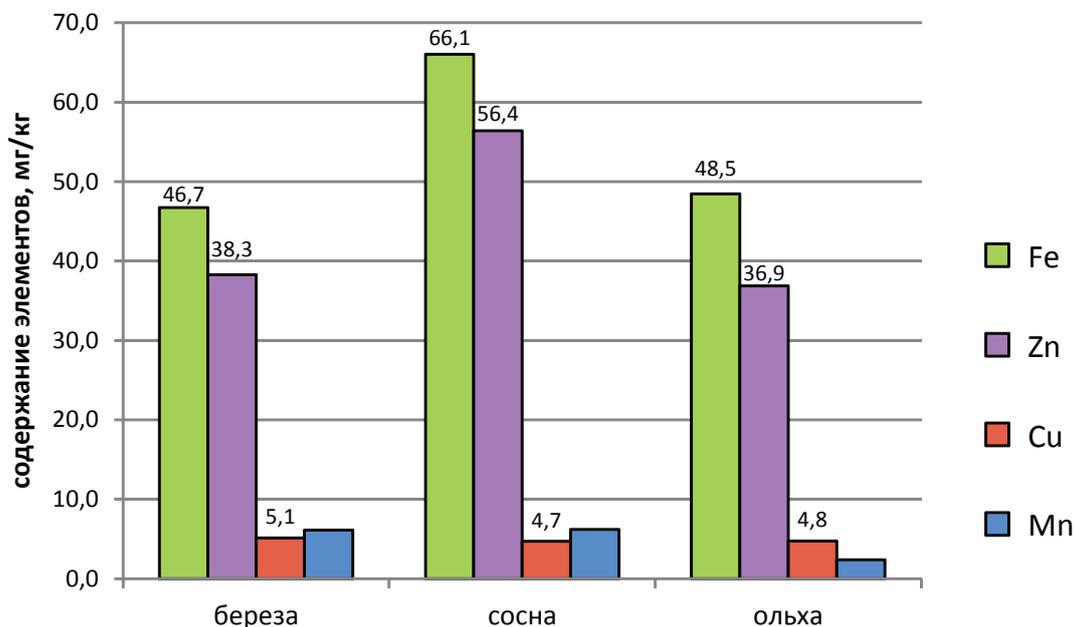


Рис. 4. Среднее содержание тяжелых металлов в базидиомах *Fomitopsis pinicola*, формирующихся на субстратах разной видовой принадлежности

Заключение. Из приведенных результатов можно сделать вывод, что для продуцентов и редуцентов в лесных экосистемах Южного Приуралья характерны видовые особенности накопления тяжелых металлов. В древесине преимущественно содержится марганец и железо, а в дереворазрушающих грибах — цинк и железо. Изученные виды грибов различаются как по суммарному накоплению тяжелых металлов, так и по содержанию отдельных элементов, в особенности марганца и железа. При этом влияние содержания тяжелых металлов в древесине на содержание их в базидиомах грибов достаточно низкое, т.е. основным фактором, определяющим накопление тяжелых металлов плодовыми телами изученных видов грибов, являются биологические особенности самих видов. Полученные данные необходимо дополнить за счет включения в исследования других видов ксилотрофных грибов, чтобы в дальнейшем показатели аккумуляции тяжелых металлов грибами могли быть адекватно использованы для анализа состояния среды.

Список использованной литературы

1. Беккер З. Э. Физиология грибов и их практическое использование. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1963. 269 с.
2. Гродзинская А. А., Самчук А. И. Мультиэлементный анализ представителей порядка Boletales методом масс-спектрометрии // Иммунопатология, аллергология, инфектология. 2010. № 1. С. 245—246.
3. Диксон М., Уэбб Э. Ферменты : в 3 т. : пер. с англ. М. : Мир, 1982. 960 с.
4. Иванов А. И., Костычев А. А., Скобанев А. В. Аккумуляция тяжелых металлов и мышьяка базидиомами макромицетов различных эколого-трофических и таксономических групп // Поволжский экологический журнал. 2008. № 3. С. 190—199.
5. Иванова Т. С., Антоненко Л. А., Бисько Н. А., Яценко О. В., Митропольская Н. Ю., Клечак Н. Р. Влияние нанометаллов на рост лекарственных грибов // Микробиологическая биотехнология — наукоёмкое направление современных знаний: Conf. Şt. Intern., Chişinău, Moldova, 6—8 iul. 2011 / com. org.: Liliana Cerpoî [et al.]. Ch.: „Elena-V.I.” SRL, 2011. С. 167—168.

6. Отнюкова Т. Н., Жижаев А. М., Кутафьева Н. П., Дутбаева А. Т. Макромицеты как биоиндикаторы загрязнения окружающей среды территории г. Красноярск и его окрестностей // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2012. № 11. С. 101—113.
7. Сафонов М. А. Трутовые грибы (Polyporaceae s. lato) лесов Оренбургской области // Микология и фитопатология. 1999. Т. 33, вып. 2. С. 75—80.
8. Сафонов М. А. Трутовые грибы Оренбургской области. Оренбург : Изд-во ОГПУ, 2000. 152 с.
9. Сафонов М. А. Структура сообществ ксилотрофных грибов. Екатеринбург : УрО РАН, 2003. 269 с.
10. Сафонова Т. И. Трофическая структура микобиоты березняков Южного Приуралья // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 16(135). С. 211—214.
11. Химич Ю. Р., Исаева Л. Г. Химический состав трутовых грибов в зоне влияния медно-никелевого производства // Вестник МГОУ. Сер. «Естественные науки». 2011. № 1. С. 72—76.
12. Чураков Б. П., Зырянова У. П., Пантелеев С. В., Морозова Н. В. Тяжелые металлы в представителях различных эволюционных групп грибов // Микология и фитопатология. 2004. Т. 38, вып. 2. С. 68—77.
13. Чураков Б. П., Лисов Е. С., Евсеева Н. А., Божок Л. Л. Микоиндикация загрязнения лесных экосистем тяжелыми металлами // Микология и фитопатология. 2000. Т. 34, вып. 2. С. 57—61.
14. Ryvar den L., Gilbertson R. L. The Polyporaceae of Europe. Oslo : Fungiflora, 1992—1994. V. 1—2. 684 p.
15. Safonov M. A. Wood-inhabiting aphyllorphoroid fungi of the Southern Preurals (Russia) // Mycena. 2006. V. 6. P. 57—66.

Поступила в редакцию 10.02.2013 г.

Сафонов Максим Анатольевич, доктор биологических наук, профессор
Оренбургский государственный педагогический университет
460014, Российская Федерация, г. Оренбург, ул. Советская, 19.
E-mail: safonovmaxim@yandex.ru

Шамраев Александр Владимирович, кандидат биологических наук, доцент
Оренбургский государственный университет
460000, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-т Победы, 13
E-mail: user_55@mail.ru

Дволучанская Юлия Вячеславовна, студент
Оренбургский государственный университет
460000, Российская Федерация, г. Оренбург, пр-т Победы, 13
E-mail: kuuudrya@mail.ru

M. A. Safonov
A. V. Shamraev
J. V. Dvoluchanskaya

Variation of some heavy metals concentration in xylotrophic fungi basidioms depending on their species and substrate properties under the conditions of the Southern Preurals

The article presents the data on the accumulation of zinc, copper, iron, manganese by some timber fungi in lowland forests of the Southern Urals. Species differences in total content and accumulation of selected heavy metals are analyzed. The correlation analysis helps to conclude that little impact is exercised by heavy metals content in wood on their content in fungi, and to establish the biological features of fungal species as the main accumulation factor.

Key words: heavy metals, zinc, manganese, copper, iron, accumulation, timber fungi, *Fomes fomentarius*, *Fomitopsis pinicola*, forest ecosystems, Southern Preurals.

Safonov Maxim Anatolyevich, Doctor of Biological Sciences, Professor
Orenburg State Pedagogical University
460014, Russian Federation, Orenburg, ul. Sovetskaya, 19.
E-mail: safonovmaxim@yandex.ru

Shamraev Alexander Vladimirovich, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
Orenburg State University
460000, Russian Federation, Orenburg, pr. Pobedy, 13
E-mail: user_55@mail.ru

Dvoluchanskaya Julia Vyacheslavovna, Student
Orenburg State University
460000, Russian Federation, Orenburg, pr. Pobedy, 13
E-mail: kuuudrya@mail.ru