

Биологическая аккумуляция химических элементов грибами агарикомицетами (*Agaricomycetes*) в условиях Приволжской возвышенности

© 2020. А. И. Иванов¹, д. б. н., профессор, А. Г. Горохова², к. б. н., н. с.,
М. И. Андреева², н. с., К. А. Дурягина³, начальник смены,

¹Пензенский государственный аграрный университет,
440014, Россия, г. Пенза, ул. Ботаническая, д. 30,

²Филиал федерального бюджетного учреждения «Федеральное управление
по безопасному хранению и уничтожению химического оружия при Министерстве
промышленности и торговли Российской Федерации (войсковая часть 70855) –
1206 объект по хранению и уничтожению химического оружия (войсковая часть 21222),
440520, Россия, Пензенская область, п. Леонидовка,

³Филиал федерального бюджетного учреждения «Федеральное управление
по безопасному хранению и уничтожению химического оружия при Министерстве
промышленности и торговли Российской Федерации (войсковая часть 70855) – 1204 объект
по хранению и уничтожению химического оружия (войсковая часть 21225),
243400, Россия, Брянская область, г. Почеп,
e-mail: rcgkim@mail.ru

Изучены закономерности накопления микроэлементов (Mn, Fe, Zn, Co) и токсичных элементов (Cr, Hg, Cd, As, Pb) в плодовых телах 13 видов наиболее распространённых съедобных грибов из класса агарикомицетов. Из четырёх рассмотренных микроэлементов в наибольшем количестве в грибах накапливаются Fe и Zn, которые необходимы для синтеза многих жизненно важных ферментов. Они необходимы всем видам, поэтому различия между их минимальными и максимальными концентрациями в плодовых телах грибов оказываются незначительными. Значение Co и Mn в метаболизме живых организмов в целом, и грибов агарикомицетов в частности, оказывается гораздо меньшим. В связи с этим, их содержание в плодовых телах грибов выражается меньшими показателями, по сравнению с Fe и Zn. Было установлено, что, чем меньшую роль играет химический элемент в метаболизме живых организмов, тем больше различия между максимальными и минимальными концентрациями его содержания в плодовых телах отдельных видов. Таким образом, значение элементов, особенно токсичных, перестаёт быть универсальным, а становится специфичным для разных видов грибов. Выявленные различия в содержании химических элементов в плодовых телах изученных видов съедобных грибов определяются, в первую очередь, не различием содержания рассматриваемых элементов в почвах их местообитаний, а биологическими особенностями отдельных видов.

Ключевые слова: биогенный круговорот, биоконцентрация, микроэлементы, токсичные элементы, съедобные грибы.

Biological accumulation of chemical elements by agaricomycetes mushrooms under conditions of Volga highlands

© 2020. A. I. Ivanov¹ ORCID: 0000-0002-3344-9969, A. G. Gorokhova² ORCID: 0000-0002-1158-4588,
M. I. Andreyeva² ORCID: 0000-0002-5205-5711, K. A. Duryagina³ ORCID: 0000-0002-6185-5147

¹Penza State Agrarian University,

30, Botanicheskaya St., Penza, Russia, 440014,

² Safe Chemical Weapons Storage and Destruction Facility of Affiliated Federal State Budget-
Funded Entity under RF Industry and Trade Ministry (troop unit 70855) –
1206 Facility for Chemical Weapons Storage and Destruction (troop unit 21222),
Leonidovka, Penza region, Russia, 440520,

³ Safe Chemical Weapons Storage and Destruction Facility of Affiliated Federal State Budget-
Funded Entity under RF Industry and Trade Ministry (troop unit 70855) –
1204 Facility for Storage and Destruction of Chemical Weapons (troop unit 21225),
Pochep, Bryansk region, Russia, 243400,
e-mail: rcgkim@mail.ru

There have been studied the regularities of microelements (Mn, Fe, Zn, Co) and toxic elements (Cr, Hg, Cd, As, Pb) accumulation in the fruiting bodies of 13 most widespread species of agaricomycetes edible mushrooms. Among four microelements examined Fe and Zn, necessary for synthesis of numerous vital enzymes, are accumulated in mushrooms most of all. They are needed to all species, that is why the differences between their minimal and maximum concentrations in mushrooms fruit bodies are insignificant. There is somewhat another situation concerning Co and Mn. Their importance in metabolism of living organisms in whole and mushrooms of agaricomycetes in particular, appears to be much smaller. In this connection their content in the fruiting bodies of mushrooms is expressed by the lower values in comparison with Fe and Zn. The less the biological importance of a chemical element, the greater the differences between maximum and minimal concentrations of its content in the fruiting bodies of particular species: that is, the importance of elements, especially toxic ones, is no more universal, it becoming specific for different species of mushrooms. The differences identified in the content of chemical elements in fruiting bodies of the examined edible mushrooms are first of all defined not by the difference of the considered elements content in the soils of their habitual areas but by biological peculiarities of particular species.

Keywords: biogenic cycle, bioconcentration, microelements, toxic elements, edible mushrooms.

Важной особенностью биологии грибов, относящихся к классу агарикомицетов (*Agaricomycetes*), является способность накапливать в плодовых телах и вегетативном мицелии различные химические элементы. В связи с этим очевиден тот факт, что грибы изучаемой группы играют огромную роль в биогеохимических циклах последних в условиях лесных экосистем и жизни древесных растений [1, 2]. Рассматриваемая проблема имеет и прикладное значение, так как многие виды грибов агарикомицетов съедобны и сведения о содержании в их плодовых телах полезных и токсичных микроэлементов представляют интерес с точки зрения гигиены питания.

Цель данной работы – изучить характер накопления микроэлементов жизненно необходимых для грибов – Mn, Fe, Zn, Co, а также токсичных элементов Cr, Hg, Cd, As и Pb в плодовых телах наиболее распространённых видов съедобных грибов.

Материалы и методы исследований

Материалом для данной работы послужили образцы плодовых тел 13 видов съедобных грибов, отбирившиеся с 2010 по 2017 гг. Отбор проб осуществляли в лесных массивах, в условиях которых содержание Mn, Fe, Zn, Co, Hg, Cr, Cd, As, Pb в почвах находится в пределах фоновых показателей для района исследований, а для токсичных элементов в пределах, установленных предельно допустимыми (ПДК) и ориентировочно допустимыми (ОДК) концентрациями.

Пензенская область располагается в пределах центральной части Приволжской возвышенности в 600 км к юго-востоку от г. Москвы. Климат района исследований умеренно-континентальный. Растительный покров имеет типичный лесостепной облик [6].

Анализ образцов грибов и субстратов, на которых они произрастали, выполнен на атомно-абсорбционном 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).

Результаты и обсуждение

В результате исследований было установлено, что изученные виды съедобных грибов в плане накопления химических элементов проявляют определённую избирательность (табл. 1, 2).

Как показали наши исследования, эссенциальные микроэлементы Mn, Fe, Zn, Co [3–5] активно накапливаются всеми изученными в процессе выполнения работы видами грибов и их концентрации в плодовых телах выражаются близкими показателями. Наименьшие различия между минимальными и максимальными значениями были определены для Zn, средние – для Co и Fe максимальные – для Mn (табл. 1).

Такие элементы, как Cr, Cd, Hg, Pb и As, токсичны для живых организмов [6–8]. Наименее изучена биоаккумуляция Hg. Поэтому сведения о её содержании в плодовых телах грибов приводятся в очень ограниченном круге работ российских и зарубежных авторов [9, 10]. По сравнению с Mn, Fe, Zn и Co, жизненно-необходимыми для грибов, Cr, Cd, Hg, Pb и As накапливаются ими в меньших количествах и более избирательно (табл. 2). На основе способности аккумулировать их, изученные виды грибов можно разделить на

Таблица 1 / Table 1

Среднее содержание микроэлементов в плодовых телах съедобных грибов, мг/кг сухого веса
Average content of microelements in the fruiting bodies of edible mushrooms,
mg/kg in dry weight chemical element

Вид / Species	Химические элементы / Chemical elements			
	Fe	Co	Zn	Mn
<i>Armillaria ostoyae</i> (Romagn.) Herink	55,10±16,53	0,086±0,026	53,22±15,97	7,58±2,27
<i>Boletus edulis</i> Bull.	102,25±30,68	0,046±0,014	80,86±24,26	11,45±3,44
<i>Cantharellus cibarius</i> Fr.	259,00±77,70	0,030±0,009	79,18±23,75	28,37±8,51
<i>Lactarius citriolens</i> Pouzar.	105,22±31,57	0,038±0,011	77,78±23,33	24,27±7,28
<i>L. deliciosus</i> (L.) Gray)	59,08±17,72	0,082±0,025	138,25±41,48	14,30±4,29
<i>L. torminosus</i> Gray	86,35±25,91	0,050±0,002	98,83±29,65	17,16±5,15
<i>Leccinum aurantiacum</i> (Bull.) Gray	44,11±13,23	0,030±0,009	58,80±17,64	4,27±1,28
<i>L. scabrum</i> (Bull.) Gray	100,66±30,20	0,021±0,006	87,46±26,24	9,34±2,80
<i>L. versipelle</i> (Fr. et Hök) Shell	87,29±26,19	0,029±0,009	71,59±21,48	7,88±2,36
<i>Russula delica</i> Fr.	203,31±61,00	0,051±0,015	67,67±20,30	11,99±3,60
<i>Suillus bovinus</i> (L.) Rousell	76,19±22,86	0,025±0,007	60,70±18,21	6,29±1,89
<i>S. granulatus</i> (L.) Rousell	173,50±52,05	0,025±0,007	80,45±24,14	17,68±5,30
<i>S. luteus</i> (L.) Rousell	125,11±37,53	0,018±0,006	128,80±38,64	18,56±5,57
Среднее значение / Average value	113,63	0,041	83,35	13,78
Соотношение между максимальным и минимальным значением / Relation between maximal and minimal values	5,87	4,09	2,60	6,64

Таблица 2 / Table 2

Среднее содержание токсичных химических элементов в плодовых телах съедобных грибов, мг/кг
Average content of toxic chemical elements in the fruiting bodies of edible mushrooms, mg/kg

Вид / Species	Химические элементы / Chemical elements				
	Cr	Hg	Cd	Pb	As
<i>Armillaria ostoyae</i>	0,09±0,03	0,037±0,011	0,052±0,016	0,46±0,14	1,27±0,38
<i>Boletus edulis</i>	0,56±0,17	0,152±0,050	0,087±0,030	2,61±0,78	1,27±0,38
<i>Cantharellus cibarius</i>	0,73±0,22	0,012±0,004	0,031±0,009	1,13±0,34	0,80±0,24
<i>Lactarius citriolens</i>	0,76±0,23	0,034±0,010	0,017±0,005	1,19±0,36	3,41±1,02
<i>L. deliciosus</i>	4,73±1,42	0,081±0,024	0,054±0,016	1,22±0,37	12,31±3,70
<i>L. torminosus</i>	0,19±0,06	0,043±0,013	0,024±0,007	1,99±0,60	1,32±0,40
<i>Leccinum aurantiacum</i>	0,10±0,03	0,012±0,004	0,900±0,270	1,12±0,37	0,07±0,02
<i>L. scabrum</i>	0,09±0,03	0,029±0,009	0,160±0,048	3,77±1,13	0,80±0,24
<i>L. versipelle</i>	0,04±0,01	0,019±0,006	0,070±0,021	0,90±0,30	3,32±0,99
<i>Russula delica</i>	0,08±0,02	0,050±0,015	0,022±0,007	1,34±0,40	0,36±0,11
<i>Suillus bovinus</i>	0,16±0,05	0,026±0,008	0,030±0,009	0,05±0,02	6,99±2,1
<i>Suillus granulatus</i>	0,11±0,03	0,037±0,011	0,210±0,063	3,59±1,08	3,75±1,13
<i>S. luteus</i>	0,14±0,04	0,037±0,011	0,240±0,072	1,53±0,50	4,17±1,25
Среднее значение / Average value	0,60	0,04	0,15	1,60	3,06
Соотношение между максимальным и минимальным значением Relation between maximal and minimal values	118,25	12,70	52,94	75,40	175,86

три группы: слабо аккумулирующие, аккумулирующие и сильно аккумулирующие (табл. 2).

Так, в отношении **Cg** слабо аккумулирующими (менее 0,01 мг/кг) являются *Armillaria ostoyae*, *Leccinum scabrum*, *L. versipelle*, *Russula delica*; аккумулирующими (от 0,01 до 1,00 мг/кг) – *Cantharellus cibarius*, *Lactarius citriolens*, *L. torminosus*, *Leccinum aurantiacum*, *Suillus bovinus*, *S. granulatus*, *S. luteus*; сильно аккумулирующими (более 1,00 мг/кг) – *Lactarius deliciosus*. Максимальный показатель содержания этого элемента превышает минимальный в 118 раз.

В отношении **Hg** слабо аккумулирующими (менее 0,03 мг/кг) являются *Armillaria ostoyae*, *Lactarius citriolens*, *Leccinum aurantiacum*, *L. scabrum*, *L. versipelle*, *Suillus bovinus*, *S. granulatus*, *S. luteus*; аккумулирующими (от 0,30 до 0,70 мг/кг) – *Lactarius torminosus*, *Russula delica*; сильно аккумулирующие (более 0,70 мг/кг) – *Boletus edulis* и *Lactarius deliciosus*. Максимальный показатель содержания этого элемента превышает минимальный в 12,7 раз.

По отношению к **Cd** слабо аккумулирующими (менее 0,03 мг/кг) являются *Leccinum aurantiacum*, *L. versipelle*, *Lactarius citriolens*, *L. torminosus*, *Suillus bovinus*, *Russula delica*; аккумулирующими (от 0,04 до 0,10 мг/кг) – *Armillaria ostoyae*, *Lactarius deliciosus*; сильно аккумулирующие (более 0,10 мг/кг) – *Boletus edulis*, *L. scabrum*, *Suillus granulatus*, *S. luteus*. Максимальный показатель превышает минимальный в 52,9 раза.

По отношению к **Pb** слабо аккумулирующими (менее 1,00 мг/кг) являются *Armillaria ostoyae*, *Leccinum versipelle*, *Suillus bovinus*; аккумулирующими (от 1,00 мг/кг до 3,00 мг/кг) – *Boletus edulis*, *Leccinum aurantiacum*, *Lactarius citriolens*, *L. deliciosus*, *L. torminosus*, *Russula delica*, *S. luteus*; сильно аккумулирующими (более 3,00 мг/кг) – *Suillus granulatus* и *L. scabrum*. Максимальный показатель превышает минимальный в 75,4 раза.

По отношению к **As** слабо аккумулирующими (менее 1,00 мг/кг) являются *Leccinum aurantiacum*, *L. scabrum*, *Russula delica*; аккумулирующими (от 1,00 до 5,00 мг/кг) – *Armillaria ostoyae*, *Boletus edulis*, *Leccinum versipelle*, *Lactarius citriolens*, *L. torminosus*, *Suillus granulatus*, *S. luteus*; сильно аккумулирующими (более 5,00 мг/кг) – *Lactarius deliciosus* и *Suillus bovinus*. Максимальный показатель превышает минимальный в 175,9 раза.

Как показывает сравнение данных, полученных в результате исследований, с данными

других исследователей, по содержанию рассматриваемых элементов в съедобных грибах они вполне сопоставимы [9, 11–13]. Однако в настоящее время их сравнение и выявление региональных особенностей в накоплении химических элементов в съедобных грибах не представляется возможным, так как в работах различных авторов приводятся разные виды. По мнению же большинства авторов, главным фактором, определяющим характер накопления химических элементов в плодовых телах грибов, является их видовая принадлежность [14–16]. Поэтому изучение характера биоаккумуляции химических элементов в географическом аспекте может дать объективный результат лишь при сравнении идентичных списков видов, в плодовых телах которых проводилось изучение характера биологической аккумуляции тех или иных химических элементов.

В некоторых работах также отмечается зависимость характера биоадсорбции химических элементов от состава субстрата [17, 18]. Однако большинство работ, посвящённых этой проблеме, содержат сведения, отрицающие значительное влияние данного фактора [19, 20].

Заключение

Интенсивность накопления химических элементов в плодовых телах агарикомицетов зависит от их роли в физиологических процессах грибных организмов. Жизненно необходимые элементы накапливаются в них в больших количествах, чем токсичные. Из четырёх рассмотренных микроэлементов в наибольших количествах накапливаются Fe и Zn. Они необходимы всем видам, поэтому различия между их минимальными и максимальными концентрациями в плодовых телах оказываются не существенными. Роль Co и Mn в метаболизме грибов менее значительна. Соответственно и их содержание в плодовых телах выражается меньшими величинами. Как показывает сравнение различий между максимальными и минимальными концентрациями рассматриваемых химических элементов, в плодовых телах изученных видов грибов наблюдается важная закономерность. Эссенциальные микроэлементы, необходимые для процессов жизнедеятельности живым организмам, накапливаются всеми видами грибов и их содержание в плодовых телах различных видов выражается близкими значениями. Максимальные показатели оказываются выше минимальных не более, чем в шесть раз.

Максимальные показатели содержания токсичных элементов превышают минимальные в двенадцать и более раз. Это указывает на то, что активно концентрировать в плодовых телах Cr, Hg, Cd, Pb и As могут лишь немногие виды. Вероятно, токсичные элементы каким-то образом включаются в их метаболизм, однако физиологический механизм этого явления требует специальных исследований.

Литература

1. Meharg A.A., Cairney J.W.G. Coevolution of mycorrhizal symbionts and their hosts to metal contaminated environments // *Advances in Ecological Research*. 1999. No. 30. P. 70–112.
2. Colpaert J.V., Assche J.A. The effects of cadmium on ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* L. // *New Phytologist*. 1993. No. 123. P. 325–333.
3. Grilton R. Inorganic biochemistry of iron metabolism: from molecular mechanism to clinical consequences. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2001. 342 p.
4. Беккер З.В. Физиология и биохимия грибов. М.: Издательство Московского университета, 1988. 230 с.
5. Иванов А.И., Чернышов Н.В., Кузин Е.Н. Природные условия Пензенской области. Современное состояние. Пенза: РИО ПГУ, 2017. Т. 1. 236 с.
6. Никитина О.В., Шалеев С.В., Горшина Е.С., Русинова Т.В., Ярополов А.И. Роль ионов двухвалентного марганца в функционировании лигнолитических ферментов базидиального гриба *Trametes pubescens* // *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия*. 2005. Т. 46. № 4. С. 267–273.
7. Онищенко Г.Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А., Авалиани С.Л., Буштуева К.А. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. 408 с.
8. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду Р – 2.1.10.1920-04. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.
9. Kalac P., Svoboda L., Havlickova B. Contents of cadmium and mercury in edible mushroom // *Journal of Applied Biomedicine*. 2004. No. 2. P. 15–20.
10. Demirbas A. Concentration of 21 metals in 18 species of mushroom growing in the East Black Sea region // *Food Chemistry*. 2001. No. 75. P. 453–457.
11. Цапалова И.Э., Бакайтис В.И., Кутафьева Н.П., Позняковский В.М. Экспертиза грибов. Качество и безопасность. Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2009. 288 с.
12. Королева Ю.В., Стеганцев В.В., Вихранева О.П., Чибисова Н.В. Аккумуляция тяжёлых металлов лесными грибами в Калининградской области // *Вестник*

Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2014. № 1. С. 78–85.

13. Laaksovirta K., Lodenius M. Mercury content of fungi in Helsinki // *Ann. Bot. Fenn.* 1979. No. 16. P. 208–212.

14. Иванов А.И., Горохова А.Г., Андреева М.И., Мухамедшин Р.К. Биологическая аккумуляция кадмия плодовыми телами агарикомицетов (*Agaricomycetes*) // *Микология и фитопатология*. 2017. Т. 51. № 3. С. 158–167.

15. Melgar M., Alonso J., Perez-Lopez M., Garcia M.A. Influence of some factors in toxicity and accumulation of cadmium from edible wild macrofungi in Spain // *J. Environm. Sci. Health*. 1998. V. 33. No. 4. P. 439–455.

16. Tyler G. Accumulation and exclusion of metals in *Collybia peronata* and *Amanita rubescens* // *Tran. Brit. Mycol. Soc.* 1982. V. 79. No. 2. P. 239–245.

17. Gast C.H., Jansen E., Bierling J., Haanstra L. Heavy metals in mushrooms and their relationship with soil characteristics // *Chemosphere*. 1988. V. 17. No. 4. P. 789–799.

18. Michelot D., Poirer F., Melendez-Howell L. Metal content profiles in mushrooms collected in primary forest of Latin America // *Arch. Environm. Contaminat. Toxicol.* 1999. No. 36. P. 256–263.

19. Stivje T., Besson R. Mercury, cadmium, lead and selenium content of mushroom species belonging to the genus *Agaricus* // *Chemosphere*. 1976. No. 2. P. 151–158.

20. Иванов А.И., Костычев А.А., Скобанев А.В. Аккумуляция тяжёлых металлов и мышьяка базидиомами макромицетов различных трофических и таксономических групп // *Поволжский экологический журнал*. 2008. № 3. С. 190–199.

References

1. Meharg A.A., Cairney J.W.G. Coevolution of mycorrhizal symbionts and their hosts to metal contaminated environments // *Advances in Ecological Research*. 1999. No. 30. P. 70–112. doi: 10.1016/S0065-2504(08)60017-3
2. Colpaert J.V., Assche J.A. The effects of cadmium on ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* L. // *New Phytologist*. 1993. No. 123. P. 325–333. doi: 10.1111/j.1469-8137.1993.tb03742.x
3. Grilton R. Inorganic biochemistry of iron metabolism: from molecular mechanism to clinical consequences. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2001. 342 p.
4. Bekker Z.V. Physiology and biochemistry of fungi. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1988. 230 p. (in Russian).
5. Ivanov A.I., Chernyshov N.V., Kuzin E.N. Natural conditions of the Penza region. Current status. Penza: RIO PGU, 2017. V. 1. 236 p. (in Russian).
6. Nikitina O.V., Shaleev S.V., Gorshina E.S., Rusinova T.V., Jaropolov A.I. Physiology and biochemistry of fungi // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2. Himiya*. 2005. V. 46. No. 4. P. 267–273 (in Russian).

7. Onishhenko G.G., Novikov S.M., Rahmanin Yu.A., Avaliani S.L., Bushtueva K.A. Basis for assessing the risk to public health when exposed to chemicals polluting the environment. Moskva: Research Institute of Human Ecology and Environmental Hygiene, 2002. 408 p. (in Russian).
8. Guidance on the assessment of public health risks from exposure to chemicals that pollute the environment. R 2.1.10.1920-04. Moskva: Federal'nyy centr gossan'yepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004. 143 p. (in Russian).
9. Kalac P., Svoboda L., Havlickova B. Contents of cadmium and mercury in edible mushroom // Journal of Applied Biomedicine. 2004. No. 2. P. 15–20. doi: 10.32725/jab.2004.002
10. Demirbas A. Concentration of 24 metals in 18 species of mushroom growing in the East Black Sea region // Food Chemistry. 2001. No. 75. P. 453–457. doi: 10.1016/S0308-8146(01)00236-9
11. Capalova I.Je., Bakajtis V.I., Kutaf'eva N.P., Poznyakovskiy V.M. Examination of fungi. Quality and safety. Novosibirsk: Sibirskoe universitetskoe izdatel'stvo, 2009. 288 p. (in Russian).
12. Koroleva Ju.V., Stegancev V.V., Vihraneva O.P., Chibisova N.V. Accumulation of heavy metals by forest mushrooms in the Kaliningrad region // Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. 2014. No. 1. P. 78–85 (in Russian).
13. Laaksovirta R., Lodenius M. Mercury content of fungi in Helsinki // Ann. Bot. Fenn. 1979. No. 16. P. 208–212.
14. Ivanov A.I., Gorohova A.G., Andreeva M.I., Mухamedshin R.K. Biological accumulation of cadmium by the fruit bodies of agaricomycetes // Mikologiya i fitopatologiya. 2017. V. 51. No. 3. P. 158–167 (in Russian).
15. Melgar M., Alonso J., Perez-Lopez M., Garcia M.A. Influence of some factors in toxicity and accumulation of cadmium from edible wild macrofungi in Spain // J. Environm. Sci. Health. 1998. V. 33. No. 4. P. 439–455. doi: 10.1080/03601239809373156
16. Tyler G. Accumulation and exclusion of metals in *Collybia peronata* and *Amanita rubescens* // Tran. Brit. Mycol. Soc. 1982. V. 79. No. 2. P. 239–245. doi: 10.1016/S0007-1536(82)80109-5
17. Gast C.H., Jansen E., Bierling J., Haanstra L. Heavy metals in mushrooms and their relationship with soil characteristics // Chemosphere. 1988. V. 17. No. 4. P. 789–799. doi: 10.1016/0045-6535(88)90258-5
18. Michelot D., Poirer F., Melendez-Howell L. Metal content profiles in mushrooms collected in primary forest of Latin America // Arch. Environm. Contaminat. Toxicol. 1999. No. 36. P. 256–263. doi: 10.1016/0045-6535(88)90258-5
19. Stivje T., Besson R. Mercury, cadmium, lead and selenium content of mushroom species belonging to the genus *Agaricus* // Chemosphere. 1976. No. 2. P. 151–158.
20. Ivanov A.I., Kostychev A.A., Skobanov A.V. Heavy metal accumulation and arsenic basidiome of macromycetes of different trophic and taxonomic groups // Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal. 2008. No. 3. P. 190–199 (in Russian).