

## ФИЗИОЛОГИЯ, БИОХИМИЯ, БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 582.284.51 : 614.73 (470.40)

© А. И. Иванов,<sup>1</sup> М. А. Плотников<sup>2</sup>

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ АККУМУЛЯЦИЯ ПРИРОДНЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ПЛОДОВЫМИ ТЕЛАМИ АГАРИКОМИЦЕТОВ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

IVANOV A. I., PLOTNIKOV M. A. THE BIOACCUMULATION OF NATURAL AND ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN AGARICOMYCETES FRUIT BODIES IN FOREST ECOSYSTEMS OF PENZA REGION

<sup>1</sup> Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, Россия<sup>2</sup> Региональный центр государственного экологического контроля и мониторинга по Пензенской области, Пенза, Россия<sup>1</sup> Penza State Agricultural Academy, Penza, Russia<sup>2</sup> Regional Center of state ecological control and monitoring of Penza Region, Penza, Russia  
rcgekim@mail.ru

Изучена биологическая аккумуляция природных ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) и искусственных ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) радионуклидов представителями важнейших родов класса *Agaricomycetes*. Проанализированы на гамма-спектрометрическом комплексе СКС-50М плодовые тела 47 видов грибов, относящихся к трофическим группам симбиотрофов, ксилотрофов и подстилочных сапротрофов. Установлено, что разные виды грибов накапливают в своих плодовых телах рассматриваемые радионуклиды с различной интенсивностью. Выявлены виды-концентраторы  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , использование которых как пищевого и лекарственного сырья нежелательно из-за высокой радиоактивности. Это *Paxillus involutus*, *Russula claroflava*, *Tricholoma flavovirens* и *Xerocomus badius*. Установлено, что суммарная удельная активность у представителей различных трофических групп неодинакова. Наиболее высокой она оказывается у симбиотрофов, а самой низкой у ксилотрофов. Подстилочные сапротрофы занимают среднее положение. Интенсивность биологической аккумуляции природных и искусственных радионуклидов у представителей различных трофических групп различается. Ксилотрофы и подстилочные сапротрофы активнее накапливают природные, а симбиотрофы — искусственные радионуклиды.

Ключевые слова: *Agaricomycetes*, радиоактивный фон, природные радионуклиды, искусственные радионуклиды, биологическая аккумуляция.

The bioaccumulation of natural ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$ ) and artificial ( $^{137}\text{Cs}$  and  $^{241}\text{Am}$ ) radionuclides of key genera of *Agaricomycetes* was studied. The fruiting bodies of 47 fungi belonging to the trophic groups of symbiotrophs, xylophages and litter saprotrophs were analyzed by spectrometric complex SCS-50M. It was found that different types of fungi accumulate considered radionuclides in their fruiting bodies with varying intensity. Using of identified species-concentrators  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{241}\text{Am}$  as a food and medicinal raw materials is undesirable due to the high radioactivity. They are *Paxillus involutus*, *Russula claroflava*, *Tricholoma flavovirens*, *Xerocomus badius*. The total specific activity of the representatives of different trophic groups is not the same. It is the highest in symbiotrophs, and the lowest in xylophages. Litter saprotrophs occupy a middle position. The bioaccumulation intensity of natural and artificial radionuclides differs in representatives of different trophic groups. Xylophages and litter saprotrophs accumulate natural radionuclides more actively, at the same time symbiotrophs actively accumulate artificial radionuclides.

Key words: *Agaricomycetes*, radioactivity, natural radionuclides, artificial radionuclides, bioaccumulation.

Проблема биологической аккумуляции радионуклидов грибами класса *Agaricomycetes* рассматривается во многих публикациях отечественных и зарубежных

авторов. Однако хорошо изученной ее считать нельзя, так как большинство этих работ посвящено проблеме накопления  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах грибов в условиях

техногенного загрязнения. Информация же о биологической аккумуляции природных радионуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , а также искусственного радионуклида  $^{241}\text{Am}$  очень ограничена (Gorbunova, 1999). При этом в большинстве работ проблема накопления радионуклидов в плодовых телах агарикомицетов рассматривается как прикладная, т. е. с точки зрения расчета порогов вредности загрязненной грибной продукции для здоровья человека (Scheglov, Tsvetnova, 2011). Реально она гораздо шире.

Радиоактивность и ионизирующее излучение существовали задолго до зарождения жизни на Земле и присутствовали в космосе до появления солнечной системы (Kuzin, 1991). Это дает основание считать, что формирование биосферы в целом и отдельных экосистем, в частности лесов умеренного пояса, проходило под влиянием данных факторов. Живые организмы оказались не только адаптированы к ним, естественный радиационный фон стал для них жизненно важным фактором. Его поддержание в природных экосистемах связано с их способностью удерживать в себе природные радионуклиды, что достигается, с одной стороны, сорбционной способностью почвы, а с другой — биологической аккумуляцией. Эти процессы являются двумя основными составляющими биогеохимических циклов радиоактивных элементов, которые в последние десятилетия оказались сильно нарушены под влиянием хозяйственной деятельности человека.

Естественный радиационный фон, включающий в себя космическое излучение, оказался дополнен искусственным и технологически повышенным. Последние возникли в связи с испытаниями ядерного оружия, авариями на атомных объектах, широкими масштабами разработки недр и размещением отходов. Испытание ядерного оружия, техногенные катастрофы, отработанное ядерное топливо и предприятия по добыче и обогащению урана не только изменили естественный радиационный фон. Они стали причиной появления новых радиоактивных изотопов, в частности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и др., которые составили искусственный радиационный фон, являющийся наиболее опасным для живых организмов (Mashkovich, Panchenco, 1990; Varsukov, Varsukov, 2003). Это объясняется тем, что искусственные радионуклиды появились на планете в последние десятилетия, в связи с чем адаптивные механизмы к создаваемому ими фону никак не могли выработаться. Радиоактивные же элементы естественного происхождения в течение миллионов лет эволюции присутствовали в биосфере, и биота к ним приспособилась. Кроме того, искусственный и технологически повышенный радиационные фоны существенно повысили естественный, сильно увеличив суммарную радиационную нагрузку на живое вещество планеты.

Радионуклиды активно включены в биогеохимические циклы. Среди различных таксономических групп живых организмов в биологической аккумуляции этих элементов большую роль играют агарикомицеты (Scheglov, Tsvetnova, 2001; Dementev, 2007). Благодаря разветвленной структуре вегетативного тела — мицелия, пронизывающего содержащий радионуклиды

субстрат, они обладают колоссальной сорбционной способностью, в десятки и сотни тысяч раз превосходящей таковую у других живых организмов. Другой причиной активности агарикомицетов в отношении накопления радионуклидов является высокая концентрация в мицелии белков, связывающих их атомы, и высокая интенсивность обмена веществ, способствующая этому процессу (Nifontova, 2003).

Целью данной работы было изучение биологической аккумуляции природных ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) и искусственных ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) радионуклидов плодовыми телами агарикомицетов в условиях лесных экосистем, слабо затронутых последствиями техногенных катастроф и не находящихся под влиянием горно-обогатительной и атомной промышленности (Izrael et al., 1994).

### Материалы и методы

В качестве района исследований была выбрана часть территории Пензенской обл., подвергшаяся значительному влиянию Чернобыльской катастрофы (Vakulovsky et al., 1998). Этот регион располагается в пределах Приволжской возвышенности в 600 км к юго-востоку от Москвы. Ему свойственны лесостепные ландшафты, для которых характерно чередование островных лесных массивов с обширными пространствами распаханной степей. Хорошая влагообеспеченность и разнообразие экотопов определяют обильное плодоношение и богатство видового состава агарикомицетов. Места отбора проб плодовых тел агарикомицетов показаны на рис. 1.

Материалом для исследования были плодовые тела агарикомицетов, относящиеся к различным трофическим группам, и субстраты, на которых они развивались. Всего в работе использовалось 47 видов, из них симбиотрофов — 26, ксилотрофов — 17, подстилочных сапротрофов — 4. Небольшое количество последних объясняется возможностью использования для проведения измерений только видов с крупными плодовыми телами, поскольку объем одной пробы составляет порядка 5 кг сырых грибов. При этом количество проб по каждому виду должно быть не менее трех. Исследования проводились в течение 2007—2009 гг.

Сбор и подготовка материалов к анализу проводились по «Методике выполнения гамма-спектрометрических измерений активности радионуклидов в пробах почвы и растительных материалов», утвержденной и введенной в действие приказом Россельхоза № 192 от 05.09.94 г. Анализ осуществляется посредством набора гамма-спектра образцов на гамма-спектрометрическом комплексе СКС-50М, разработанном и произведенном ведущим в России предприятием Минатома РФ «Гринстартехнолоджиз».

Кроме определения средней удельной активности в Бк/кг в плодовых телах грибов и субстратах, на которых они развивались, нами рассчитывался коэффициент накопления  $K_n$  по формуле

$$K_n = A_b/A_s,$$



Таблица 1

## Средняя удельная активность природных и искусственных радионуклидов в плодовых телах грибов и их питающих субстратах

Виды грибов по семействам и трофическим группам	Природные радионуклиды						Искусственные радионуклиды								
	<sup>40</sup> K			<sup>226</sup> Ra			<sup>232</sup> Th			<sup>137</sup> Cs			<sup>241</sup> Am		
	средняя удельная активность в плодовом теле, Бк/кг	коэффициент накопления в субстрате, Бк/кг	коэффициент накопления	средняя удельная активность в плодовом теле, Бк/кг	коэффициент накопления в субстрате, Бк/кг	коэффициент накопления	средняя удельная активность в плодовом теле, Бк/кг	коэффициент накопления в субстрате, Бк/кг	коэффициент накопления	средняя удельная активность в плодовом теле, Бк/кг	коэффициент накопления в субстрате, Бк/кг	коэффициент накопления	средняя удельная активность в плодовом теле, Бк/кг	коэффициент накопления в субстрате, Бк/кг	коэффициент накопления
<i>Amanita muscaria</i> (L.) Lam.	746.0 ± 64.5	75.0 ± 6.4	9.9	31.0 ± 3.2	36.0 ± 3.1	0.9	70.0 ± 6.4	788	245.0 ± 21.3	73.0 ± 7.3	3.4	51.0 ± 3.2	23.0 ± 1.8	296	
<i>Boletus edulis</i> Bull.	397.3 ± 170.7	154.7 ± 94.9	2.6	149.2 ± 15.2	32.0 ± 12.2	4.7	48.6 ± 9.8	563.7	307.1 ± 3.0	127.0 ± 31.5	2.41	19.6 ± 3.4	57.0 ± 7.5	0.3	
<i>B. erythropus</i> Pers.	417.2 ± 42.3	114.8	3.58	82.6 ± 8.5	39.3 ± 17.2	0.8	43.1 ± 15.6	1.6	19.1	74.1 ± 0.3	0.3	13.9 ± 4.5	37.0 ± 13.6	0.4	
<i>B. impolitus</i> Fr.	447.3 ± 158.4	112.8 ± 18.4	4.0	28.8 ± 7.5	41.0 ± 16.2	0.7	50.0 ± 4.2	520.6	11.8 ± 92.9	79.3 ± 26.1	0.1	15.8 ± 7.6	39.0 ± 14.6	27.6	
<i>B. reticulatus</i> Schaeff.	247.2 ± 51.0	112.6 ± 18.2	2.2	114.5 ± 31.3	42.1 ± 16.3	2.7	46.8 ± 5.6	0.6	306.2 ± 11.5	53.3 ± 21.2	5.74	18.4 ± 3.6	32.6 ± 13.2	0.6	
<i>Leccinum scabrum</i> (Bull.) Gray	511.0 ± 143.4	201.5 ± 70.5	2.6	42.8 ± 13.0	23.5 ± 7.2	1.8	43.8 ± 4.2	565.3	11.3 ± 4.0	16.0 ± 4.4	0.7	52.3 ± 18.0	59.3 ± 13.7	63.6	
<i>L. versipelle</i> (Fr. et Hoh) Snell	428.3 ± 63.8	98.0 ± 28.7	4.4	29.0 ± 2.0	17.7 ± 9.1	1.6	45.3 ± 6.0	509	12.7 ± 5.0	14.7 ± 4.5	0.9	33.7 ± 4.9	31.3 ± 6.4	46.4	
<i>Suillus bovinus</i> (L.) Roussel	975.3 ± 280.7	190.7 ± 98.7	5.1	63.0 ± 27.5	18.8 ± 7.4	3.4	48.3 ± 2.2	1.3	145.8 ± 34.9	14.0 ± 3.7	10.4	60.0 ± 14.8	42.0 ± 21.1	1.4	
<i>S. granulatus</i> (L.) Roussel	446.7 ± 62.6	186.0 ± 61.0	2.4	57.2 ± 17.6	21.0 ± 2.5	2.7	39.2 ± 6.8	1.4	37.6 ± 18.4	16.4 ± 2.1	2.3	46.6 ± 7.1	45.6 ± 3.4	1.0	
<i>S. luteus</i> (L.) Roussel	624.0 ± 66.1	184.0 ± 49.4	3.4	62.0 ± 24.3	18.6 ± 0.5	3.3	37.4 ± 9.1	1.6	44.0 ± 19.5	14.6 ± 3.1	3.0	50.0 ± 7.3	42.0 ± 8.0	1.2	
<i>Xerocomus badius</i> (Fr.) E. J. Gilbert	294.3 ± 41.0	151.0 ± 17.3	1.9	115.7 ± 24.4	25.0 ± 7.9	4.6	40.3 ± 24.3	5.6	6183.7 ± 1801.7	102.3 ± 60.2	60.4	648.3 ± 93.7	38.0 ± 34.7	17.1	
<i>X. chrysenteron</i> (Bull.) Quéf.	618.3 ± 27.4	123.0 ± 27.9	5.0	54.7 ± 10.8	20.0 ± 2.6	2.7	27.0 ± 5.6	2.5	37.7 ± 19.6	31.3 ± 4.5	1.2	50.3 ± 24.5	19.3 ± 2.1	2.6	
<i>Cantharellus cibarius</i> Fr.	261.7 ± 97.4	153.3 ± 51.5	1.7	49.0 ± 19.2	17.7 ± 1.5	2.8	63.3 ± 9.7	0.9	23.7 ± 6.9	50.0 ± 20.1	0.5	37.3 ± 10.1	30.0 ± 3.6	1.2	
<i>Cortinarius trimpfians</i> Fr.	203.7 ± 24.8	73.0 ± 7.0	2.8	58.7 ± 0.6	9.0 ± 1.0	6.5	2.3 ± 0.6	4.7	118.0 ± 11.1	35.0 ± 3.5	3.4	81.7 ± 6.4	15.0 ± 2.6	5.4	

## Симбиотрофы

*Amanitaceae**Boletaceae**Cantharellaceae**Cortinariaceae*

*Russulaceae*

<i>Lactarius citriolens</i> Pouzar	194.0 ± 22.7	124.7 ± 48.6	1.6	20.3 ± 3.2	19.0 ± 4.6	1.1	34.3 ± 11.7	31.7 ± 11.0	1.1	10.0 ± 3.6	51.0 ± 28.5	0.2	24.3 ± 7.5	43.0 ± 11.5	0.6
<i>L. necator</i> (Bull.) Pers.	547.3 ± 84.2	61.7 ± 4.5	8.9	92.4 ± 13.0	40.2 ± 12.0	2.3	45.2 ± 10.4	34.4 ± 5.6	1.3	496.4 ± 179.5	94.4 ± 22.5	5.3	63.0 ± 20.5	37.4 ± 12.6	1.7
<i>L. torminosus</i> (Schaeff.) Gray	312.0 ± 53.0	176.3 ± 81.7	1.8	17.6 ± 9.8	17.8 ± 9.1	1.0	11.5 ± 3.3	43.8 ± 4.2	0.3	11.6 ± 6.1	35.2 ± 4.4	0.3	24.6 ± 6.5	60.2 ± 21.7	0.4
<i>L. vellereus</i> (Fr.) Fr.	1844.0 ± 293.3	74.2 ± 13.9	24.9	57.7 ± 13.5	26.5 ± 5.2	2.2	44.8 ± 6.7	63.8 ± 9.6	0.7	55.7 ± 11.8	83.3 ± 9.6	0.7	30.3 ± 6.7	40.0 ± 10.1	0.8
<i>Russula adusta</i> (Pers.) Fr.	1480.3 ± 332.8	114.5 ± 46.6	12.9	39.0 ± 9.9	31.8 ± 5.4	1.2	57.8 ± 35.8	40.6 ± 8.0	1.4	803.0 ± 256.0	167.2 ± 103.3	4.8	125.0 ± 23.9	36.4 ± 17.8	3.4
<i>R. claroflava</i> Grove	1055.0 ± 245.6	57.0 ± 15.1	18.5	34.0 ± 4.4	18.6 ± 7.6	1.8	80.0 ± 18.6	35.6 ± 8.1	2.2	2008.6 ± 494.2	108.0 ± 36.2	18.6	224.0 ± 47.0	32.6 ± 11.4	6.9
<i>R. delica</i> Fr.	456.6 ± 123.2	142.1 ± 48.3	3.2	44.0 ± 15.6	37.6 ± 15.6	1.2	28.1 ± 11.2	57.1 ± 28.6	0.5	21.6 ± 7.3	119.8 ± 110.6	0.2	51.9 ± 20.5	37.1 ± 15.2	1.4
<i>R. foetens</i> Pers.	633.4 ± 195.4	221.2 ± 181.8	2.9	33.6 ± 10.9	24.0 ± 8.6	1.4	24.2 ± 8.8	70.0 ± 28.1	0.3	6.6 ± 1.3	52.4 ± 28.7	0.1	42.8 ± 22.5	23.0 ± 8.5	1.9
<i>R. xerampelina</i> (Schaeff.) Fr.	536.0 ± 207.6	65.3 ± 18.0	8.2	91.3 ± 9.3	22.3 ± 9.2	4.1	56.8 ± 23.8	35.8 ± 14.2	1.6	764.8 ± 88.2	124.0 ± 34.2	6.2	91.0 ± 16.8	45.3 ± 17.6	2.0

*Tricholomataceae*

<i>Tricholoma flavovirens</i> (Pers.) S. Lundell	613.7 ± 119.6	63.0 ± 13.1	9.7	38.3 ± 15.6	22.0 ± 5.3	3.0	86.0 ± 20.1	33.0 ± 8.5	2.6	3428.0 ± 524.5	140.3 ± 24.0	24.4	302.3 ± 22.1	41.0 ± 20.0	7.4
<i>T. portentosum</i> (Fr.) Quéf.	259.0 ± 69.5	65.7 ± 8.1	3.9	70.7 ± 13.3	30.0 ± 6.6	2.4	42.3 ± 10.3	29.7 ± 3.2	1.4	274.0 ± 31.6	145.3 ± 16.7	1.9	50.7 ± 9.0	40.3 ± 14.6	1.3

*Paxillaceae*

<i>Paxillus involutus</i> (Batsch.) Fr.	441.5 ± 135.1	99.3 ± 51.6	4.4	30.8 ± 11.0	15.5 ± 7.0	2.0	42.8 ± 7.5	29.5 ± 6.8	1.4	34304.3 ± 5333.7	87.8 ± 29.0	390.9	380.5 ± 71.5	40.3 ± 18.3	9.5
---	---------------	-------------	-----	-------------	------------	-----	------------	------------	-----	------------------	-------------	-------	--------------	-------------	-----

Ксилотрофы

<i>Armillaria ostoyae</i> (Roman.) Herink. magn.	461.8 ± 179.9	257.8 ± 38.4	1.8	45.5 ± 26.3	52.3 ± 13.7	0.9	30.8 ± 11.4	32.3 ± 3.0	1.0	28.0 ± 5.7	24.8 ± 7.9	1.1	59.3 ± 16.9	66.5 ± 6.9	0.9
<i>Fomes fomentarius</i> (L.) Fr.	247.2 ± 98.6	232.6 ± 109.6	1.1	20.1 ± 6.1	22.3 ± 10.7	0.9	29.0 ± 15.0	29.7 ± 13.9	1.0	12.3 ± 4.8	11.2 ± 3.8	1.1	17.8 ± 8.3	17.2 ± 6.8	1.0
<i>Fomitopsis pinicola</i> (Sw.) P. Karst.	196.0 ± 49.9	210.8 ± 86.4	0.9	38.3 ± 8.5	15.5 ± 2.9	2.5	21.5 ± 5.9	58.8 ± 18.8	0.4	13.3 ± 3.0	6.8 ± 1.5	2.0	30.8 ± 9.4	25.5 ± 6.8	1.2
<i>Ganoderma applanatum</i> (Pers.) Pat.	286.5 ± 72.7	243.3 ± 96.0	1.2	13.8 ± 2.8	21.8 ± 4.6	0.6	24.8 ± 7.6	23.5 ± 7.8	1.1	11.0 ± 2.2	12.5 ± 2.6	0.9	21.5 ± 5.7	20.0 ± 3.7	1.1
<i>Inonotus dryadeus</i> (Pers.) Murrill	239.7 ± 110.8	345.5 ± 94.2	0.7	25.7 ± 12.8	22.2 ± 7.9	1.2	54.7 ± 22.0	33.0 ± 7.8	1.7	7.8 ± 2.3	15.5 ± 5.7	0.5	18.0 ± 3.2	12.8 ± 3.4	1.4
<i>I. obliquus</i> (Ach. ex Pers.) Pilát	347.5 ± 29.1	168.0 ± 18.1	2.1	123.0 ± 11.4	79.0 ± 5.7	1.6	53.8 ± 14.1	119.0 ± 31.3	0.5	296.3 ± 21.0	14.3 ± 1.3	20.8	201.0 ± 18.5	22.3 ± 5.6	9.0
<i>Laetiporus sulphureus</i> (Bull.) Murrill	316.3 ± 13.7	284.0 ± 39.4	1.1	36.0 ± 9.5	39.3 ± 9.3	0.9	26.7 ± 3.5	25.0 ± 7.0	1.1	12.0 ± 2.6	13.3 ± 3.5	0.9	22.0 ± 7.0	12.7 ± 4.2	1.7



Таблица 1 (продолжение)

Виды грибов по семействам и трофическим группам	Искусственные радионуклиды														
	Природные радионуклиды						Искусственные радионуклиды								
	<sup>40</sup> K			<sup>226</sup> Ra			<sup>232</sup> Th			<sup>137</sup> Cs			<sup>241</sup> Am		
	средняя удельная активность		коэф-фици-ент накопления	средняя удельная активность		коэф-фици-ент накопления	средняя удельная активность		коэф-фици-ент накопления	средняя удельная активность		коэф-фици-ент накопления	средняя удельная активность		коэф-фици-ент накопления
в плодном теле, Бк/кг	в субстрате, Бк/кг		в плодном теле, Бк/кг	в субстрате, Бк/кг		в плодном теле, Бк/кг	в субстрате, Бк/кг		в плодном теле, Бк/кг	в субстрате, Бк/кг		в плодном теле, Бк/кг	в субстрате, Бк/кг		
<i>Lenzites betulina</i> (L.) Fr.	381.7 ± 51.6	234.3 ± 64.1	1.6	17.7 ± 3.5	19.7 ± 8.6	0.9	10.0 ± 2.6	23.3 ± 8.7	0.4	19.7 ± 6.0	13.7 ± 3.2	1.4	19.3 ± 3.1	21.7 ± 6.8	0.9
<i>Lycoperdon pyriforme</i> Schaef.	769.3 ± 196.7	64.0 ± 13.9	12.0	44.0 ± 15.5	26.3 ± 4.5	1.7	27.7 ± 6.5	34.0 ± 7.9	0.8	12.7 ± 3.1	9.7 ± 2.1	1.3	57.7 ± 14.6	39.7 ± 7.4	1.5
<i>Piptoporus betulinus</i> (Bull.) P. Karst.	175.3 ± 47.8	257.3 ± 59.9	0.7	33.5 ± 10.0	16.8 ± 4.9	2.0	65.5 ± 15.2	35.3 ± 5.4	1.9	11.3 ± 2.9	12.8 ± 2.6	0.9	31.5 ± 11.9	13.5 ± 3.3	2.3
<i>Phaeocolus schweinitzii</i> (Fr.) Pat.	348.0 ± 80.2	143.7 ± 45.8	2.4	61.7 ± 12.1	18.3 ± 6.0	3.4	105.3 ± 14.0	30.0 ± 9.8	3.5	15.0 ± 2.6	8.7 ± 2.1	1.7	18.3 ± 6.1	22.3 ± 5.5	0.9
<i>Phellinus ignitarius</i> (L.) Quél.	255.3 ± 88.6	437.3 ± 59.0	0.6	15.3 ± 4.3	23.8 ± 4.6	0.6	39.0 ± 5.3	16.8 ± 4.8	2.3	13.0 ± 1.8	22.3 ± 5.7	0.6	24.0 ± 5.1	35.8 ± 10.0	0.7
<i>Ph. robustus</i> (P. Karst.) Boudard et Galzin	322.8 ± 108.6	338.3 ± 120.7	1.0	22.2 ± 8.8	13.8 ± 5.2	1.6	50.5 ± 5.4	45.7 ± 16.9	1.1	18.2 ± 4.7	12.2 ± 4.1	1.5	13.3 ± 5.3	10.7 ± 3.7	1.3
<i>Ph. tremulae</i> (Bondartsev) Bondartsev et P. N. Borisov	249.8 ± 65.6	102.3 ± 33.5	2.4	24.3 ± 5.9	29.3 ± 7.6	0.8	22.5 ± 12.1	41.3 ± 6.8	0.5	5.8 ± 1.3	17.8 ± 5.6	0.3	14.0 ± 4.1	15.5 ± 3.7	0.9
<i>Pleurotus cornucopiae</i> (Jacq.) P. Kumm.	320.7 ± 59.0	293.3 ± 52.2	1.1	15.7 ± 2.5	19.0 ± 7.2	0.8	30.7 ± 7.2	32.3 ± 7.4	0.9	9.7 ± 2.3	16.0 ± 1.0	0.6	26.7 ± 4.2	39.7 ± 8.6	0.7
<i>Polyporus squamosus</i> (Huds.) Fr.	392.7 ± 106.9	332.0 ± 57.6	1.2	40.0 ± 7.9	21.0 ± 4.6	1.9	95.0 ± 37.5	31.0 ± 7.0	3.1	24.7 ± 2.5	17.7 ± 5.1	1.4	38.7 ± 19.7	12.0 ± 3.0	3.2
<i>Trametes gibbosa</i> (Pers.) Fr.	184.8 ± 27.1	352.0 ± 75.0	0.5	30.0 ± 6.1	40.0 ± 9.6	0.8	17.0 ± 4.8	13.8 ± 3.3	1.2	19.5 ± 4.9	16.8 ± 3.3	1.2	13.3 ± 2.5	33.3 ± 10.5	0.4
Подстилочные сапротрофы															
<i>Agaricus abruptibulbus</i> Peck	1360.3 ± 145.2	274.7 ± 47.0	5.0	87.3 ± 10.5	26.7 ± 2.5	3.3	62.0 ± 11.1	47.0 ± 9.2	1.3	15.0 ± 1.7	5.7 ± 2.1	2.6	44.3 ± 8.3	59.3 ± 17.1	0.7
<i>Clitocybe nebularis</i> (Batsch) P. Kumm.	749.3 ± 131.0	190.3 ± 60.1	3.9	41.5 ± 12.6	36.0 ± 10.7	1.2	44.3 ± 21.1	36.7 ± 9.6	2.2	185.8 ± 30.7	117.8 ± 26.8	1.6	27.0 ± 6.3	17.3 ± 7.5	1.6
<i>Lepista nuda</i> (Bull.) Cooke	1235.0 ± 242.2	276.7 ± 77.6	4.5	106.0 ± 19.0	36.0 ± 9.5	2.9	46.3 ± 6.9	27.3 ± 11.5	1.7	213.7 ± 109.5	102.3 ± 91.6	2.1	273.3 ± 155.6	111.3 ± 54.9	2.5
<i>Macrolepiota procera</i> (Scop.) Singer	1215.8 ± 114.1	75.4 ± 7.3	16.1	86.2 ± 7.9	24.6 ± 2.3	3.5	81.4 ± 7.5	9.0 ± 1.0	9.0	92.6 ± 8.6	90.4 ± 9.6	1.0	45.4 ± 10.9	75.0 ± 6.0	0.6

В третью группу попадает только один вид — *Cortinarius triumphans*, для которого Кн составляет 6.5. Видов-концентраторов  $^{226}\text{Ra}$ , для которых Кн превышает 15, не выявлено.

$^{232}\text{Th}$ , как и  $^{226}\text{Ra}$ , не является биогеном, в связи с чем закономерности биоаккумуляции этих элементов имеют сходные черты. Не накапливают  $^{232}\text{Th}$  16 видов, т. е. 34.0 % от числа изученных. Среди них присутствуют как представители ксилотрофов, так и симбиотрофов. Все изученные виды подстилочных сапротрофов имеют Кн для  $^{232}\text{Th}$  более единицы. Вторая группа слабонакапливающих видов составляет 38.2 %. К ней относятся 18 видов, среди которых максимальные Кн (более 3) имеют *Cortinarius triumphans*, *Phaeolus schweinitzii*, *Polyporus squamosus*. В третью группу видов с Кн более 5 вошли *Xerocomus badius* и *Macrolepiota procera*.

Среди искусственных радионуклидов наиболее активно в плодовых телах грибов накапливается  $^{137}\text{Cs}$ . Причиной этого является то, что он по химическим свойствам приближается к калию, в котором грибы испытывают повышенную потребность. Особенно активно  $^{137}\text{Cs}$  поглощается на кислых почвах при дефиците элементов минерального питания. К первой группе грибов Кн,  $^{137}\text{Cs}$  для которых ниже единицы, относится 16 видов. При этом минимальные коэффициенты накопления 0.5 и менее характерны для *Boletus erythropus*, *B. impolitus*, *Cantharellus cibarius*, *Lactarius citriolens*, *L. torminosus*, *Russula delica*, *R. foetens*, *Inonotus dryadeus*, *Phellinus tremulae*. К группе слабонакапливающих  $^{137}\text{Cs}$  грибов относится 13 видов, к средненакапливающим (Кн от 5.0 до 15.0) — пять видов, к сильнонакапливающим (Кн более 15) — три вида: *Russula claroflava*, *Tricholoma flavovirens* и *Inonotus obliquus*. Имеются также суперконцентраторы. Это *Xerocomus badius* и *Paxillus involutus*, которые имеют Кн 60.4 и 390.9 соответственно, на что указывают и другие исследователи (Gorbunova, 1999).

$^{241}\text{Am}$  аккумулируется в плодовых телах базидиальных макромицетов менее активно. Не накапливают этот элемент 17 видов, т. е. 37 % от числа изученных. Среди них есть представители всех рассматриваемых трофических групп. Минимальный Кн (0.5 и менее) имеют *Boletus impolitus*, *B. erythropus*, *B. reticulatus*, *Lactarius torminosus* и *Trametes gibbosa*. К группе слабонакапливающих видов (Кн 1.0—5.0) относятся 22 вида, к средненакапливающим — один вид (*Xerocomus badius*).

Как показывает анализ изложенных материалов, в отношении биоаккумуляции радионуклидов у грибов существует определенная специализация. При этом в поддержании естественного радиационного фона главную роль играют одни виды, а в поддержании искусственного — другие. Максимальную суммарную удельную активность по природным радионуклидам (более 1000 Бк/кг) имеют *Agaricus abruptibulbus*, *Macrolepiota procera*, *Russula adusta*, *R. claroflava*, *R. xerampelina*, *Lactarius vellereus*, *Lepista nuda*; по искусственным — *Paxillus involutus*, *Xerocomus badius*, *Tricholoma flavovirens*, *Russula claroflava*.

Таблица 2

Суммарная удельная активность исследуемых радионуклидов в плодовых телах изучаемых видов грибов

Вид гриба	Суммарная удельная активность		
	$^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ и $^{232}\text{Th}$ , Бк/кг	$^{137}\text{Cs}$ , $^{241}\text{Am}$ , Бк/кг	всех исследуемых нуклидов, Бк/кг
<i>Paxillus involutus</i>	515.0	34684.8	35199.8
<i>Xerocomus badius</i>	637.7	6832.0	7469.7
<i>Tricholoma flavovirens</i>	738.0	3730.3	4468.3
<i>Russula claroflava</i>	1169.0	2232.7	3401.7
<i>R. adusta</i>	1577.4	928.0	2505.4
<i>Lactarius vellereus</i>	1946.5	86.0	2032.5
<i>Lepista nuda</i>	1387.3	487.0	1874.3
<i>Agaricus abruptibulbus</i>	1509.6	59.3	1568.9
<i>Russula xerampelina</i>	684.0	855.7	1539.7
<i>Macrolepiota procera</i>	1383.4	138.0	1521.4
<i>Suillus bovinus</i>	1102.6	205.7	1308.3
<i>Inonotus obliquus</i>	524.3	497.3	1021.6
<i>Amanita muscaria</i>	788.1	296.0	1084.1
<i>Lactarius necator</i>	684.9	559.3	1244.2
<i>Lepista nebularis</i>	838.7	212.8	1051.5
<i>Lycoperdon pyriforme</i>	841.0	70.4	911.4
<i>Boletus edulis</i>	563.7	326.7	890.4
<i>Suillus luteus</i>	746.6	94.0	840.6
<i>Xerocomus chrysenteron</i>	741.0	81.6	822.6
<i>Russula foetens</i>	691.2	49.4	740.6
<i>Boletus reticulatus</i>	390.2	324.6	714.8
<i>Tricholoma portentosum</i>	372.0	324.7	696.7
<i>Suillus granulatus</i>	558.3	84.2	642.5
<i>Leccinum scabrum</i>	565.3	63.5	628.8
<i>Armillaria ostoyae</i>	538.1	87.3	625.4
<i>Russula delica</i>	528.7	73.5	602.2
<i>Boletus erythropus</i>	563.9	33.0	596.9
<i>Polyporus squamosus</i>	527.7	63.4	591.1
<i>Leccinum versipelle</i>	509.0	46.4	555.4
<i>Phaeolus schweinitzii</i>	515.0	33.3	548.3
<i>Boletus impolitus</i>	520.6	27.6	548.2
<i>Cortinarius triumphans</i>	273.4	199.7	473.1
<i>Lenzites betulina</i>	409.4	39.0	448.4
<i>Phellinus robustus</i>	395.5	31.5	427.0
<i>Cantharellus cibarius</i>	364.4	61.0	425.4
<i>Laetiporus sulphureus</i>	379.0	34.0	413.0
<i>Pleurotus cornucopiae</i>	367.1	36.4	403.5
<i>Lactarius torminosus</i>	341.1	36.2	377.3
<i>Ganoderma applanatum</i>	333.1	32.5	365.6
<i>Phellinus igniarius</i>	309.6	37.0	346.6
<i>Inonotus dryadeus</i>	320.1	25.8	345.9
<i>Piptoporus betulinus</i>	274.3	42.8	317.1
<i>Fomes fomentarius</i>	296.3	30.1	326.4
<i>Fomitopsis pinicola</i>	255.8	44.1	299.9
<i>Phellinus tremulae</i>	296.6	19.8	316.4
<i>Lactarius citriolens</i>	248.6	34.3	282.9
<i>Trametes gibbosa</i>	231.8	32.8	264.6

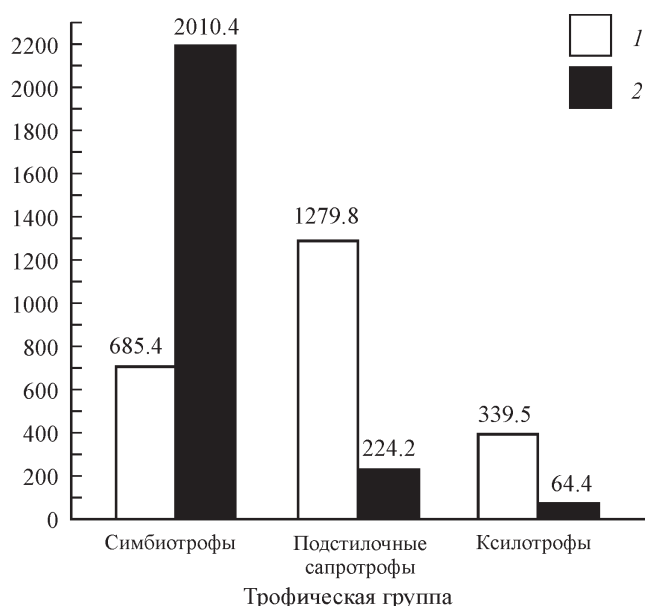


Рис. 2. Биологическая аккумуляция природных (1) и искусственных (2) радионуклидов плодовыми телами грибов различных трофических групп.

В связи с тем что природный радиационный фон дополняется искусственным, возникает вопрос о суммарной удельной активности плодовых тел агарикомицетов (Alekseev et al., 2002). По этому показателю изученные виды можно разделить на четыре группы: 1) виды, у которых суммарная удельная активность радионуклидов в плодовых телах составляет менее 500 Бк/кг; 2) виды, у которых суммарная удельная активность радионуклидов в плодовых телах находится в интервале от 500 до 1000 Бк/кг; 3) виды, у которых суммарная удельная активность радионуклидов в плодовых телах находится в интервале от 1000 до 2000 Бк/кг; 4) виды, у которых суммарная удельная активность радионуклидов в плодовых телах превышает 2000 Бк/кг.

К первой группе относятся преимущественно дереворазрушающие грибы. Среди них наименьшей суммарной удельной активностью характеризуются виды, имеющие многолетние и однолетние плодовые тела деревянистой и кожистой консистенции. Из микоризообразующих грибов в эту группу попадают *Cantharellus cibarius* и *Lactarius citriolens*. Во второй группе представлены наиболее распространенные виды микоризообразующих грибов и немногочисленные ксилотрофы: *Armillaria ostoyae*, *Polyporus squamosus* и *Phaeolus schweinitzii*. Третью группу составляют подстилочные сапротрофы и микоризообразующие грибы. Из ксилотрофов к ней относится только чага — *Inonotus obliquus*. Среди видов данной трофической группы она является самым активным накопителем радионуклидов, в первую очередь  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$ , что делает проблематичным ее использование в медицинской практике (Ivanov et al., 2011a, 2011b). Четвертую группу формируют семь видов. Все они являются симбиотрофами. Среди них ценными съедобными грибами считаются *Tricholoma flavovirens* и *Xerocomus*

*badius*. Однако употребление их в пищу из-за высокой суммарной удельной активности радионуклидов в плодовых телах нежелательно.

Как показывает анализ результатов суммарной удельной активности у представителей различных трофических групп агарикомицетов, наиболее высокой она оказывается у симбиотрофов, на что указывают и другие исследователи (Bolsunovsky et al., 2006). Самой низкой — у ксилотрофов. Подстилочные сапротрофы занимают промежуточное положение.

В накоплении природных и искусственных радионуклидов у представителей различных трофических групп также имеются определенные особенности (рис. 2).

Ксилотрофы и подстилочные сапротрофы накапливают преимущественно естественные радионуклиды. Их суммарная удельная активность в плодовых телах первых превышает таковую у искусственных радионуклидов в 5.3 раза, у вторых — в 5.7 раз. В отношении симбиотрофов наблюдается обратная картина. Искусственные радионуклиды они накапливают в 2.9 раза активнее, чем естественные. Такое положение, вероятно, связано не только с биологическими особенностями грибов. В настоящее время искусственные радионуклиды практически не поступают на поверхность почвы и растений с атмосферными выпадениями. Те же их атомы, которые были вовлечены в прошлом в лесные экосистемы, переместились под влиянием внутритпочвенного стока в нижнюю часть горизонта А, где локализованы корневые окончания, несущие микоризы. При залповых выбросах, т. е. сразу после техногенных аварий, максимальное количество искусственных радионуклидов, вероятно, будет накапливаться в плодовых телах подстильных сапротрофов.

В результате проведенной работы мы можем заключить следующее. Из природных радионуклидов агарикомицеты наиболее интенсивно накапливают  $^{40}\text{K}$ . Это объясняется тем, что калий является важнейшим биогенным элементом. Поэтому его радиоактивный изотоп  $^{40}\text{K}$  агарикомицеты накапливают значительно активнее, чем  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ , которые не являются жизненно необходимыми для представителей данной группы грибов. Наиболее высокие коэффициенты накопления  $^{40}\text{K}$  имеют *Macrolepiota procera*, *Lactarius vellereus* и *Russula claroflava*.

Среди искусственных радионуклидов наиболее активно агарикомицеты накапливают  $^{137}\text{Cs}$ . Наибольшая средняя удельная активность, определяемая им, зафиксирована в плодовых телах *Paxillus involutus* и *Xerocomus badius*. Достаточно высокой она является также у *Inonotus obliquus*, *Russula claroflava* и *Tricholoma flavovirens*.

$^{241}\text{Am}$  аккумулируется в плодовых телах агарикомицетов менее активно, чем  $^{137}\text{Cs}$ . Наибольшая определяемая им средняя активность в Бк/кг среди изученных видов была зарегистрирована для *Xerocomus badius*.

В связи с тем что природный радиационный фон дополняется искусственным, возникает вопрос о суммарной удельной активности радионуклидов в пло-



вых телах. Наименьшие ее показатели свойственны ксилотрофам, имеющим многолетние и однолетние плодовые тела кожистой и деревянистой консистенции, наиболее высокие — микоризообразующим грибам: *Paxillus involutus*, *Russula claroflava*, *Tricholoma flavovirens*, *Xerocomus badius*.

Суммарная удельная активность у представителей различных трофических групп неодинакова. Наиболее высокой она является у симбиотрофов, а самой низкой у ксилотрофов. Подстилочные сапротрофы занимают промежуточное положение.

Интенсивность биологической аккумуляции природных и искусственных радионуклидов у представителей различных трофических групп различается. Ксилотрофы и подстилочные сапротрофы активнее накапливают природные, а симбиотрофы — искусственные радионуклиды.

## REFERENCES

- Alekseev S. V., Pivovarov Y. P., Yanushanets O. I. Human ecology. Guide. Moskva: Ikarus, 2002. 770 p. (in Russ.).
- Barsukov O. A., Barsukov K. A. Radioecology. Moskva: Nauchnyi mir, 2003. 253 p. (in Russ.).
- Belousova I. M., Shtukkenberg Y. M. Natural radioactivity. Moskva: Meditsina, 1961. 220 p. (in Russ.).
- Bolsunovsky A. Y., Dementyev D. V., Bondareva L. G. Estimation of accumulation of technogenous radionuclides by mushrooms in the affected zone of Krasnoyarsk mountain-chemical factory // Radiogeologiya. 2006. Vol. 46, N 1. P. 67—74 (in Russ.).
- Dementev D. V. Assessment the intensity of anthropogenic radionuclides accumulation in some species of mushrooms and shrubs in forest ecosystems of the central part of the Krasnoyarsk Territory. Krasnoyarsk, 2007. 100 p. (in Russ.).
- Gorbunova I. A. Heavy metals and radioactive elements in the Altai Republic // Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 1999. N 3. P. 277—288 (in Russ.).
- Ivanov A. I., Barsukov O. A., Plotnikov M. A. Radioactivity in edible mushrooms in Penza region // Izvestia Penzinskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. 2011a. N 25. P. 52 (in Russ.).
- Ivanov A. I., Barsukov O. A., Plotnikov M. A. The problem of radionuclides accumulation in medicinal mushrooms in forest communities of the Penza Region // Niva Povolzhya. 2011b. N 2. P. 105—109 (in Russ.).
- Izrael Y. A., Kvasnikova E. V., Nazarov I. M., Fridman Sh. D. Global and regional contamination of the European territory of the former USSR // Meteorologiya i gidrologiya. 1994. N 5. P. 5—9 (in Russ.).
- Korbonskaya Y. I., Amanova N. M. Mineral composition of edible mushrooms in Tajikistan // Mikologiya i fitopatologiya. 1975. Vol. 9. P. 527—530 (in Russ.).
- Kuzin A. M. Natural radioactivity and its significance for the Earth's biosphere. Moskva: Nauka, 1991. 116 p. (in Russ.).
- Mashkovich V. P., Panchenko A. M. Basics of radiation safety. Moskva: Energoatomizdat, 1990. 176 p. (in Russ.).
- Nifontova M. G. Licheno- and bryoidication and radioactive pollution // Diss. ... doct. biol. nauk. Perm, 2003. 250 p. (in Russ.).
- Scheglov A. I., Tsvetnova O. B. Mushrooms as bioindicators at technogenic pollution // Priroda. 2001. N 11. P. 7—16 (in Russ.).
- Scheglov A. I., Tsvetnova O. B. Role of forest ecosystem in radioactive pollution // Priroda. 2011. N 4. P. 22—32 (in Russ.).
- Vakulovskiy S. M., Izrael Y. A., Imshennik E. V., Kvasnikova E. V., Kontorovich R. F., Nazarov I. M., Nikiforov M. I., Stukin E. D., Fridman Sh. D. Atlas of radioactive contamination of the European part of Russia, Belarus and Ukraine. Moskva: Roskartografiya, 1998. P. 143 (in Russ.).

Поступила 7 V 2014