

## Роль физико-химических свойств почвы в формировании радиоактивного загрязнения грибов

М.В. Кадука, В.Н. Шутов, Г.Я. Брук, М.И. Балонов

ФГУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева»  
Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург

*Настоящая работа посвящена анализу закономерностей накопления  $^{137}\text{Cs}$  в лесных грибах после Чернобыльской аварии и роли физико-химических и климатических характеристик мест произрастания грибов в формировании радиоактивного загрязнения грибов различных биологических видов. Для анализа полученных результатов создана база данных, содержащая значения более 500 измерений концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в отобранных пробах грибов. В качестве параметра, характеризующего миграцию радионуклида из почвы в грибы, использовался коэффициент перехода (КП). Получено количественное соотношение между значениями КП  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в грибы различных биологических видов, выраженное в виде уравнений регрессии по наиболее коррелирующим параметрам.*

Ключевые слова: коэффициент перехода, почвенно-климатические характеристики, макромицеты, миграция цезия, уравнения множественной регрессии.

### Введение

За истекшие годы накопилось значительное количество источников информации по радиоактивному загрязнению отдельных компонентов лесных экосистем. Тем не менее полной ясности, как в специфике загрязнения, так и в возможном влиянии отдельных составляющих на формирование дозовых нагрузок на население пока нет. Однако, известно, что по накопительной способности цезия-137 грибы значительно превосходят все другие компоненты лесного биогеоценоза. В среднем удельная активность грибов более чем в 20 раз превосходит таковую максимально загрязненного слоя лесной подстилки. Грибы являются абсолютными концентраторами цезия-137 в биогеоценозе, а с учетом того, что запасы биомассы мицелия составляют около 200 г/м<sup>2</sup> [1], очевидна значимость роли грибов в биохимической миграции этого радионуклида. Потребление в пищу даже относительно малого количества грибов может приводить к поступлению в организм человека значительных величин активности цезия-137 из-за высоких уровней его содержания в грибах некоторых биологических видов.

**Цель исследования.** Целью настоящей работы являлось изучение закономерностей накопления  $^{137}\text{Cs}$  различными видами съедобных грибов после аварии на ЧАЭС и определение роли почвенно-климатических характеристик мест произрастания грибов на их способность к аккумуляции цезия-137. Установленные закономерности могут быть использованы для прогнозирования дозы внутреннего облучения жителей за счет потребления грибов (без непосредственного отбора проб грибов) и обоснования рекомендаций по снижению доли «грибной компоненты» в формировании дозы внутреннего облучения населения.

Исследования проводились в 1997–2001 г. в следующих регионах – в Брянской, Орловской и Тульской областях, наиболее загрязненных чернобыльскими выпадениями, а также в Мурманской и Архангельской областях, где загрязнение территории цезием-137 в настоящее время обусловлено как глобальными, так и чернобыльскими выпадениями. В Брянской области поверхностная активность  $^{137}\text{Cs}$  на почве достигает 3700 кБк/м<sup>2</sup>, основной фонд почвенного покрова области составляют дерново-подзолистые почвы, представленные тремя видами: слабо-, средне- и сильноподзолистыми, в каждом

из них встречаются в основном песчаные и супесчаные, а также легкосуглинистые. В Орловской и Тульской областях поверхностная активность  $^{137}\text{Cs}$  на почве достигает 750 кБк/м<sup>2</sup>, почвенный покров областей представлен, в основном, светло-серыми, серыми лесными, и черноземными почвами. В Мурманской и Архангельской областях поверхностная активность  $^{137}\text{Cs}$  на почве достигает 7 кБк/м<sup>2</sup>, почвы относятся к группе полярно-бореального почвообразования, в основном развиты болотный и подзолистый типы почв.

Для анализа полученных результатов была создана база данных, содержащая около 500 результатов измерения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в пробах грибов различных биологических видов активно потребляемых населением радиоактивно загрязненных территорий.

**Материалы и методы.** Для отбора проб почвы в лесных массивах использовался штатный пробоотборник, имеющий форму цилиндра с площадью цилиндра 20 см. Исследуемая глубина керна почвы – 20 см. Органический и минеральный слои почвы анализировались отдельно.

Для приготовления средней пробы грибов отбирали около 0,5 кг грибов (сырой вес) каждого вида. Грибы тщательно очищали от частиц почвы и растительных остатков, измельчали, сушили и взвешивали («сухой» вес). При этом каждый вид грибов обрабатывали отдельно.

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы и грибов измерялось гамма-спектрометрическим методом на сцинтилляционном гамма-спектрометре с датчиком NaI, размером 100\*100 мм, с колодцем объемом 200 см<sup>3</sup>.

При определении коэффициента перехода цезия-137 из почвы в грибы (КП) использовались данные об удельной активности цезия-137 в пробах грибов, отобранных в процессе исследования на выбранных участках в лесах обследуемых областей. Плотность поверхностного загрязнения почвы обследованных участков определяли как отношение активности репрезентативной пробы почвы к площади, с которой данная проба была отобрана. Величины коэффициента перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в грибы при этом рассчитывали как отношение удельной активности радионуклида в пробе к рассчитанной плотности поверхностного загрязнения почвы лесного массива, в котором проба грибов была отобрана (КП, м<sup>2</sup>/кг).

Агрохимический анализ органического и подзолистого горизонтов почвы проводили по отдельности. Для каждого образца были определены следующие параметры: pH, концентрация обменного калия ( $K_2O$ , мг/100 г), концентрация органического вещества (С, %), сумма обменных оснований (S, мг-экв/100 г), емкость катионного обмена (ЕКО, мг-экв/100 г) и содержание физической глины (Глина, %). Все агрохимические анализы проводили в соответствии со стандартными методиками [2] в отделе химико-аналитического контроля почв и агрохимикатов ГУЦАС "Ленинградский".

**Результаты исследования**

**Влияние почвенно-климатических условий на КП  $^{137}Cs$  в грибы.** Во время грибного сезона (июль-октябрь) 1997-2001 годов были обследованы 53 лесных участка в Брянской области, 23 лесных участка в Орловской и Тульской областях и 12 лесных участков в Мурманской и Архангельской областях. Первые две зоны исследования имеют сравнимые уровни загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, но существенно различаются по типам доминирующих там почв. Почвы Мурманской и Архангельской областей близки по своим агрохимическим характеристикам к почвам Брянской области, однако в радиоактивное загрязнение почвы на Севере существенный вклад вносят радионуклиды глобального происхождения. В условиях выше упомянутых зон исследования произрастают и активно потребляются в пищу местным населением грибы, характерные для северной и центральной Европейской части России.

Был выполнен отбор проб почвы и грибов на выбранных лесных участках (около 500 проб грибов) и агрохимический анализ образцов почвы. Было обнаружено, что КП

$^{137}Cs$  из почвы в грибы Брянской, Мурманской и Архангельской областей, где преобладают дерново-подзолистые песчаные почвы, на 1-2 порядка выше, чем соответствующие КП для Орловской и Тульской области, где преобладают черноземные и серые лесные почвы (табл. 1). Исключение составили лишь грибы порядка рядовковые, КП цезия для которых достоверно возрастают с увеличением значений емкости катионного обмена почвы и значений содержания обменных оснований. Различия в значениях коэффициентов перехода из почвы в грибы обусловлены биологическими особенностями различных родов и семейств, степенью развитости и заглупления мицелия, микоризной приуроченностью к той или иной древесной породе, предрасположенностью к определенным местам обитания, которые характеризуются различной степенью увлажненности, освещенности, разным бонитетом почвы [3].

При проведении анализа полученных результатов, грибы делили на две группы, обусловленные различным типом питания: микоризообразующие (живущие в симбиозе с растением и получающие от него углеводы) и сапротитные (осуществляющие процессы жизнедеятельности за счет разложения мертвого органического вещества) макромицеты. Микоризообразующие грибы характеризуются гораздо более высокими КП цезия-137 из почвы в грибы, чем сапротрофы. Это обусловлено тем, что через мицелий микоризообразующих макромицетов, в силу его расположения в почвенном профиле, функциональных особенностей и высокой аккумулятивной способности, проходит гораздо большее количество различных веществ, содержащихся в почве (в том числе и цезия-137), чем через мицелий сапротрофов. Кроме того, мицелий напочвенных сапротрофов находится, в основном, лишь на глу-

Таблица 1

**Средние величины коэффициентов перехода  $^{137}Cs$  из почвы в наиболее употребляемые сухие грибы,  $KП \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг} \pm$  стандартное отклонение**

Биологический вид	Брянск	Север	Орел-Тула	Биологический вид	Брянск	Север	Орел-Тула
<i>Lactarius rufus</i> (горькушка)	1390±1300	230±160	70±30	<i>Cantharellus cibarius</i> (лисичка желтая)	130±100	–	2,3±1,4
<i>Suillus luteus</i> (масленок)	1340±1270	250±150	50±40	<i>Leccinum aurantiacum</i> (подосиновик)	60±70	50±30	1,9±1,2
<i>Xerocomus</i> (моховик)	900±870	400±250	2,6±2,0	<i>Lycoperdon pyriforme</i> (дождевик)	40±40	–	2,2±2,8
<i>Lactarius deliciosus</i> (рыжик)	630±340	–	2,4±1,5	<i>Macrolepiota procera</i> (зонтик)	20±15	–	2,0±1,8
<i>Xerocomus badius</i> (польский гриб)	520±310	–	2,2±1,4	<b>Группы грибов</b>			
<i>Lactarius torminosus</i> (волнушка)	400±400	190±150	7,2±5,7	<i>Suillus</i> (масленковые)	1290±1150	250±150	50±40
<i>Leccinum scabrum</i> (подберезовик)	340±470	210±180	5,7±7,2	<i>Xerocomus</i> (моховиковые)	740±690	400±250	2,6±2,0
<i>Lactarius necator</i> (груздь черный)	330±280	–	1,5±0,7	<i>Lactarius</i> (млечники)	670±870	330±340	13±55
<i>Russula</i> (сыроежка)	320±330	160±90	3,8±2,0	<i>Russulaceae</i> (сыроежковые)	610±710	250±280	10±40
<i>Armillaria mellea</i> (опенок осенний)	310±360	–	8,7±8,6	<i>Boletaceae</i> (болетовые)	420±480	210±220	9,6±15
<i>Boletus edulis</i> (белый гриб)	250±230	42	15±10	<i>Leccinum</i> (обабковые)	310±450	130±150	5,0±6,4
<i>Tricholoma flavovirens</i> (зеленушка)	140±100	–	300±640	<i>Tricholoma</i> (рядовковые)	140±100	–	580±530
				Сапротрофы	120±230	–	5,0±6,1

бине почвенной подстилки, тогда как мицелий микоризообразующих макромицетов может заглубляться, особенно на бедных почвах, на 25–160 см [4]. Для микоризообразователей высокие КП были обнаружены у представителей семейства *Lactarius*, которые растут как в сухих сосновых лесах на бедных песчаных почвах, так и на переувлажненных заболоченных почвах. Высокие КП цезия обнаружены для грибов родов *Xerocomus* и *Suillus*, произрастающих на сухих бедных песчаных почвах. Кроме того, мицелий у представителей родов *Xerocomus* и *Suillus* развивается несколько лучше, чем у представителей родов других болетовых грибов (*Leccinium*, *Boletus*) [5]. Низкие КП, обнаруженные для грибов рода *Cantharellus* связаны с тем, что эти грибы растут в разнотравных смешанных лесах на относительно более богатых почвах [6].

**Количественная связь между физико-химическими свойствами почвы и значениями КП <sup>137</sup>Cs из почвы в различные биологические группы грибов.** Статистическая достоверность связи между коэффициентами перехо-

да <sup>137</sup>Cs из почвы в 9 биологических групп грибов проверена методом парной корреляции логарифмов этих величин. Оказалось, что коэффициенты парной корреляции между величинами КП <sup>137</sup>Cs для грибов и физико-химическими свойствами почвы достаточно высоки, это же касается коэффициента множественной корреляции (Таблица 2). Недостовверная корреляция была получена в основном между логарифмами КП <sup>137</sup>Cs из почвы в различные виды грибов и логарифмами значений содержания в почве органического вещества. Это может быть обусловлено тем, что микоризообразующие макромицеты получают органические вещества через растение-симбионт, а не непосредственно из почвы, т.о. большинство комплексов цезия с органическими веществами остается в растении. Более того, достоверная корреляция между логарифмами КП и логарифмами значений содержания в почве органического вещества была получена для сапротрофных макромицетов, получающих углеводы и комплексы цезия с органическими веществами непосредственно из почвы.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между логарифмами значений коэффициентов перехода <sup>137</sup>Cs из почвы в различные биологические группы грибов и логарифмами параметров свойств почвы**

Группы грибов	Число проб	pH	K <sub>2</sub> O	C	S	ЕКО	Глина	R**
Сапротрофы	36	-0,20*	-0,54	-0,35	-0,69	-0,49	-0,66	-0,74
<i>Boletaceae</i>	159	-0,42	-0,70	-0,35	-0,78	-0,41	-0,73	-0,82
<i>Russulaceae</i>	159	-0,56	-0,82	-0,39	-0,79	-0,53	-0,79	-0,86
<i>Aphyllorphor.</i>	20	-0,41*	-0,66	-0,27*	-0,54	-0,29*	-0,49	-0,72
<i>Lactarius</i>	103	-0,60	-0,84	-0,38	-0,81	-0,54	-0,81	-0,89
<i>Suillus</i>	24	-0,71	-0,83	-0,37*	-0,82	-0,14*	-0,67	-0,95
<i>Russula</i>	56	-0,51	-0,77	-0,41	-0,76	-0,50	-0,78	-0,82
<i>Leccinium</i>	73	-0,53	-0,74	-0,36*	-0,78	-0,43	-0,71	-0,84
<i>Paxillus</i>	37	-0,45	-0,70	-0,20*	-0,75	-0,16*	-0,56	-0,85
<i>Xerocomus</i>	34	-0,41	-0,67	-0,18*	-0,83	-0,24*	-0,74	-0,89
<i>Tricholoma</i>	26	0,09*	0,17*	0,19*	0,30	0,41	0,12*	0,58

\* – недостоверный результат

\*\* R – коэффициент множественной корреляции

Количественная связь между КП <sup>137</sup>Cs из почвы в грибы и свойствами почвы может быть установлена в виде уравнений одномерной регрессии по наиболее тесно коррелирующим с КП почвенным параметрам; пример такой зависимости показан на рисунке 1.

Для всех выделенных групп грибов были получены уравнения множественной регрессии по наиболее тесно коррелирующим с КП <sup>137</sup>Cs почвенным параметрам:

Болетовые:  $\ln(KП) = -1.2 - 0.16 \cdot \ln(K_2O) - 1.2 \cdot \ln(S) - 0.26 \cdot \ln(\text{Глина})$   
R=-0.78

Сыроежковые:  $\ln(KП) = -1.1 - 0.99 \cdot \ln(K_2O) - 0.87 \cdot \ln(S) - 0.01 \cdot \ln(\text{Глина})$   
R=-0.81

Сапротрофы:  $\ln(KП) = -3.2 + 0.19 \cdot \ln(K_2O) - 1.2 \cdot \ln(S) - 0.13 \cdot \ln(\text{Глина})$   
R=0.69

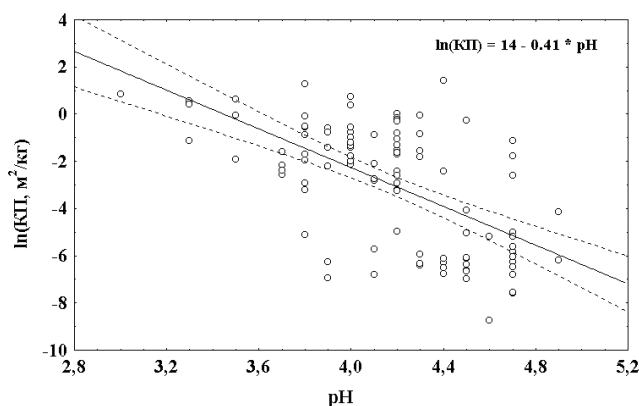


Рис. 1. Зависимость КП <sup>137</sup>Cs из почвы в грибы семейства *Lactarius* (млечники) от величины pH

*Suillus*:  $\ln(KП) = -1.1 - 0.46 \cdot \ln(K_2O) - 1.1 \cdot \ln(S) + 0.39 \cdot \ln(\text{Глина})$

R=-0.88

*Russula*:  $\ln(KП) = 2.2 - 0.44 \cdot pH - 0.75 \cdot \ln(K_2O) - 1.2 \cdot \ln(\text{Глина})$

R=-0.81

*Xerocomus*:  $\ln(KП) = -0.46 - 0.28 \cdot \ln(K_2O) - 1.6 \cdot \ln(S) - .26 \cdot \ln(\text{Глина})$

R=-0.83

*Leccinum*:  $\ln(KП) = -3.2 - 0.63 \cdot \ln(K_2O) - 1.2 \cdot \ln(S) + 0.66 \cdot \ln(\text{Глина})$

R=-0.79

*Lactarius*:  $\ln(KП) = 4.3 - 1.0 \cdot pH - 1.2 \cdot \ln(K_2O) - 0.68 \cdot \ln(\text{Глина})$

R=-0.86

Рядовковые:  $\ln(KП) = -7.8 + 2.3 \cdot \ln(EKO)$

R=0.46

### Обсуждение результатов

Таким образом, получена достоверная количественная связь между коэффициентами перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в различные группы грибов и физико-химическими свойствами почвы. Приведенные уравнения позволяют прогнозировать удельную активность цезия в грибах, произрастающих в том или ином лесном массиве, имея данные об уровнях поверхностного загрязнения почвы цезием и данные о физико-химических характеристиках почвы, без непосредственного отбора проб грибов. Основываясь на таким образом полученных прогнозных данных по содержанию цезия-137 в грибах различных видов, растущих в регионах, загрязненных после аварии на ЧАЭС, можно давать обоснованные рекомендации по снижению доли "грибной компоненты" в формировании дозы внутреннего облучения населения.

### Выводы

1. Величина коэффициента перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в грибы зависит от типа почвы, на которой они произрастают. КП  $^{137}\text{Cs}$  из бедных песчаных почв, доминирующих в Брянской области, в 10-100 раз выше, чем из плодородных серых

лесных и черноземных почв. Коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$  из торфяных и болотных почв выше, чем из песчаных;

2. Свойства почвы по степени убывающего влияния на КП  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в грибы располагаются в следующий ряд: (содержание физической глины) = (концентрация обменного калия) > (сумма концентраций обменных оснований) > (рН) > (емкость катионного обмена) > (содержание органического вещества);

3. КП  $^{137}\text{Cs}$  могут быть определены на основании уравнений множественной регрессии по наиболее коррелирующим для каждого конкретного вида грибов параметрам свойств почвы.

4. Полученные расчетные значения КП  $^{137}\text{Cs}$  могут быть использованы для прогнозирования дозы внутреннего облучения жителей за счет потребления грибов и обоснования рекомендаций по снижению доли "грибной компоненты" в формировании дозы внутреннего облучения населения.

### Список использованной литературы

- Щеглов, А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах [Текст]: / А.И. Щеглов. – По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. – М.: Наука, 1999. – 221 с.
- Петербургский, А.И. Практикум по агрохимии [Текст]: учеб. пособие / А.И. Петербургский. – М.: Колос, 1968. – 305 с.
- Kammerer, L. Uptake of radiocaesium by different species of mushrooms [Text] / L. Kammerer, L. Hiershe, E. Wirth // J. Environ. Radioactivity. – 1994. – № 11. – P. 135 – 150.
- Бурова, Л. Г. Загадочный мир грибов [Текст] / Л.Г. Бурова // Человек и окружающая среда: серия. – М.: Наука, 1991. – 115 с.
- Шубин, В.И. О глубине распространения мицелия и плодоношении макромицетов-симбиотрофов [Текст] / В.И. Шубин // Экология и плодоношение макромицетов-симбиотрофов древесных растений: тез. докл. Всес. Совещания / Петрозаводск, Научный Центр, Институт Леса. – Петрозаводск, 1992. – С. 65-66.
- Kaduka, M.V. Soil-dependant uptake of  $^{137}\text{Cs}$  by mushrooms: experimental study in the Chernobyl accident areas [Текст] / M.V Kaduka, V.N. Shutov, G.Ya. Bruk, M.I., M.I. Balonov, J.E Brown / Journal of Environmental Radioactivity.-2006.- v. 9, № 3.- P. 199 – 211.

M. Kaduka, V. Shutov, G. Bruk, M. Balonov

### Role of soil and climate characteristics in the formation of radioactive contamination of mushrooms

FSO «Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev»  
of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights protection and Human Well-being, Saint-Petersburg

*The present work is devoted to an analysis of the regularities of  $^{137}\text{Cs}$  accumulation by forest mushrooms after the Chernobyl accident and the role of physical-chemical soil characteristics and climate characteristics in the formation of radioactive contamination of mushrooms of different biological types. For the analysis of obtained results, database, containing the values of about 500 measurements of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in mushroom samples was used. Aggregated transfer factor (Tag) was used as a parameter of radionuclide migration from soil to mushroom. Quantitative relationship between  $^{137}\text{Cs}$  Tag from soil to different species of mushrooms and soil properties was obtained as regression equations with respect to the most closely correlated parameters.*

*Key words: aggregated transfer factor, physical-chemical soil characteristics and climate characteristics, macromycetes, caesium migration, multiply regression equations.*