

## К ВОПРОСУ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ $^{137}\text{Cs}$ В КОМПОНЕНТАХ ГРИБНОГО КОМПЛЕКСА \*

О. Б. Цветнова<sup>1</sup>, Н. Е. Зарубина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

На основе длительных натуральных наблюдений в основных типах лесных экосистем Украинского Полесья (30-километровая зона ЧАЭС) установлены особенности распределения  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах грибного комплекса. Показано, что концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах и микоризе грибов практически одинакова. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах меняется по мере их развития: у молодых особей различия в удельной активности шляпок и ножек минимальны, по мере созревания плодовых тел эти различия нарастают за счет накопления  $^{137}\text{Cs}$  в гименофоре.

### Введение

В настоящее время общепризнано, что грибы являются наиболее важным объектом при радиозоологическом мониторинге, поскольку являются биоиндикаторами радиоактивного загрязнения и в пищевых цепях напрямую связаны с человеком [1]. Однако положения, связанные с распределением одного из основных дозообразующих радионуклидов чернобыльского выброса -  $^{137}\text{Cs}$  - в различных частях плодовых тел высших грибов и с соотношением удельной активности в плодовых телах и мицелии грибов, длительное время оставались дискуссионными. В наших исследованиях на основе результатов собственных наблюдений и критического анализа существующих наработок по данному вопросу предпринята попытка конкретизировать особенности распределения  $^{137}\text{Cs}$  по компонентам грибного комплекса.

Как известно, основой вегетативного тела грибов является мицелий. У макромицетов споры, с помощью которых происходит размножение, образуются на плодовых телах или внутри их. Плодовые тела состоят из ножки и шляпки, на нижней стороне которой находится гименофор, несущий спороносный слой плодового тела - гимений [2 - 4]. В более ранних исследованиях на примере макро- и микроэлементов было установлено, что интенсивность аккумуляции химических элементов изменяется по мере развития плодовых тел и неодинакова у различных частей гриба. В молодых плодовых телах содержание элементов, как правило, выше, чем в старых, а концентрация их в шляпках больше, чем в ножках, поскольку все обменные процессы в грибах наиболее интенсивно протекают в молодых особях и в шляпках. [4]. Показано, что содержание химических элементов в грибах зависит от глубины залегания их мицелия, т. е. приуроченности его к зонам аккумуляции этих элементов. После Чернобыльской аварии было разработано несколько способов определения места локализации мицелия для отдельных видов макромицетов. С помощью расчета и сравнения соотношения  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  в отдельных слоях почвенного профиля и плодовых телах макромицетов установлено, что для каждого вида существуют определенные колебания величины соотношения  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ , однако на территории Европы оно практически постоянно для макромицетов одного вида [5]. Расчет и сравнение соотношения  $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$  в плодовых телах и различных слоях почвенного профиля позволил установить место локализации мицелия ряда видов грибов: у горькушки (*Lactarius rufus* Fr.), волнушки розовой (*Lactarius torminosus* (Schaeff.: Fr.) S.F.Gray), сыроежки ароматной (*Russula xerampelina* var. *Erythropus* Pelt.) - в слоях лесной подстилки; у подберезовика (*Leccinum scabrum* (Bull.: Fr.) S.F.Gray) и свинушки тонкой (*Paxillus involutus* (Batsch: Fr.) Fr.) - в почвенном профиле [6]. Виды, у которых величина данного соотношения наибольшая, характеризуются более глубоким расположением мицелия в почвенном профиле. К таким

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 01-04-48354).

видам относятся: представители рода рядовка (*Tricholoma spp*), ежевик черепичатый (*Sarcodon imbricatus (Fr.) Karst.*) и др. [7]. Было установлено также место локализации мицелия еще нескольких видов грибов: шампиньона лугового (*Agaricus arvensis Schaeff.: Secr.*), опенка осеннего настоящего (*Armillariella melea (Vahl: Fr.) P.Karst.*), дождевика жемчужного (*Lycoperdon perlatum Pers.*), польского гриба (*Xerocomus badius (Fr.) Kuhn. Ex Gilb.*), масленка зернистого (*Suillus granulatus (L.: Fr.) O. Kuntze*), козляка (*Suillus bovinus (L.: Fr.) O. Kuntze*). В работах японских исследователей [8] глубина локализации мицелия устанавливалась другим способом - с помощью корреляционного анализа на основании расчета величин коэффициента корреляции между содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах макромицетов отдельных видов и концентрацией этого радионуклида в почве послойно. Результаты этих подсчетов совпадают с результатами работ других авторов [9, 10].

### Объекты и методы исследований

Настоящие исследования проводились с 1988 по 2001 г. в основных типах лесных экосистем Украинского Полесья в пределах 30-километровой зоны ЧАЭС. Подробная характеристика радиоэкологического состояния и почвенно-растительных условий исследуемой территории изложены в наших предыдущих работах [1, 11, 12].

На стационарных пробных площадях производился отбор всех встречающихся видов высших грибов. Определение видовой принадлежности грибов проводили по справочнику-определителю [13]. Плодовые тела грибов отбирались целиком, с помощью, где это было необходимо, выкручивания. В зависимости от поставленной задачи отбирали только неповрежденные образцы молодых (2 - 3-дневных) и старых (10 - 12-дневных) плодовых тел. Сразу после отбора грибы очищали от внешних загрязнителей и отдельно по видам помещали в полиэтиленовые мешки. Из собранных грибов в тот же день в лабораторных условиях после дополнительной дезактивации этиловым спиртом отбирали пробы целых грибов и производили разделение плодовых тел на составные части: шляпки, гименофор, ножки. В полученных образцах определяли удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  на гамма-анализаторе Nokia с Li-Ge детектором, часть проб высушивали при температуре 105 °С для характеристики их полевой влажности.

Мицелий отбирали у видов грибов, произрастающих на микроучастках с неразвитыми песчаными почвами, где мицелий был слабо связан с почвенной компонентой. Это позволяло механически отделить мицелий от почвенной массы и получить необходимую пробу образца для последующих измерений. В указанных случаях плодовое тело вместе с почвенной массой объемом 80 – 100 см<sup>3</sup> аккуратно извлекалось, и затем от почвенных частиц отделялся мицелий методом декантации водой. Подобный отбор позволил с большой достоверностью отнести полученные пробы мицелия к конкретному виду макромицетов.

В лабораторных условиях отобранные пробы мицелия под микроскопом тщательно очищались от механических примесей, осторожно дезактивировались этиловым спиртом. Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  в мицелии грибов проводили с помощью модифицированного метода тонкослойных препаратов (тонких пленок) [14]. Из подготовленных проб бралась навеска (не более 190 мг) и наносилась на стандартную подложку с углублением диаметром 1,8 см. Навеска для более полной минерализации растворялась в прибавляемой по каплям концентрированной  $\text{HNO}_3$  (с одной - двумя каплями пергидроля), затем жидкость выпаривалась с помощью инфракрасной лампы. Полученный осадок растворялся в концентрированной  $\text{HCl}$ , и жидкость вновь выпаривалась под инфракрасной лампой. После этого на бета-радиометре УМФ-1500 М (установка малого фона) проводили измерения общей бета-активности. Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  при этой методике определяется с помощью установления концентрации  $^{90}\text{Y}$  (пик 2,2 МэВ), с которым стронций находится в равновесии. Удельную активность  $^{137}\text{Cs}$  рассчитывали по разности между общей бета-активностью и активностью  $^{90}\text{Sr}$ . Активностью других изотопов (в том числе  $^{40}\text{K}$ ) пренебрегали. Этот метод можно применять, если активность  $^{137}\text{Cs}$  не превышает активность  $^{90}\text{Sr}$  более чем в 10 раз.

## Результаты и обсуждение

Как уже отмечалось, в молодых плодовых телах содержание элементов, как правило, выше, чем в старых, а концентрация их в шляпках больше, чем в ножках. Для радионуклидов это положение не имеет столь однозначной трактовки. Ряд исследователей отмечает, что значимых различий в концентрации  $^{137}\text{Cs}$  между отдельными частями плодовых тел грибов не наблюдается, другие считают, что  $^{137}\text{Cs}$ , как и другие микроэлементы, в большей степени аккумулируется в шляпках [15, 16 и др.]. По нашему мнению, оба эти положения имеют право на существование. У молодых особей различия в удельной активности шляпок и ножек минимальны, по мере созревания плодовых тел эти различия появляются за счет накопления  $^{137}\text{Cs}$  в гименофорах. Различия между ними и другими частями плодовых тел грибов могут достигать 3 - 4-кратных величин (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в различных по возрасту плодовых телах грибов лесных экосистем на территории 30-километровой зоны ЧАЭС, Бк/кг сырой массы

Вид	Молодые плодовые тела		Старые плодовые тела	
	Среднее значение	Стандартная ошибка	Среднее значение	Стандартная ошибка
"Припять" (плотность загрязнения почвы 13000 кБк/м <sup>2</sup> )				
Зеленушка ( <i>Tricholoma flavovirens</i> (Pers.: Fr.) Lund.)	200000	21000	174000	19000
"Парышев" (плотность загрязнения почвы 200 кБк/м <sup>2</sup> )				
Зеленушка	2500	700	3300	400
Рядовка коричневая ( <i>Tricholoma imbricatus</i> (Fr.: Fr.) Kumm.)	2200	600	2500	500

Таблица 2. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в различных частях плодовых тел грибов лесных экосистем на территории 30-километровой зоны ЧАЭС, Бк/кг сырой массы

Вид	Гименофор	Шляпка	Ножка	Целиком
"Куповатое" (плотность загрязнения почвы 900 кБк/м <sup>2</sup> )				
Горькушка	44500 ± 3500	15300 ± 5000	19800 ± 4000	21600 ± 1400
"Лелев" (плотность загрязнения почвы 6000 кБк/м <sup>2</sup> )				
Зеленушка	45600 ± 3000	11700 ± 4300	11800 ± 4500	16000 ± 2000
Свинушка тонкая	56000 ± 4700	25800 ± 6600	21000 ± 5000	29000 ± 4900
"Зимовище" (плотность загрязнения почвы 17000 кБк/м <sup>2</sup> )				
Волнушка	31400 ± 3500	21600 ± 5000	17000 ± 5000	18000 ± 3400
Подберезовик	45000 ± 3300	21100 ± 5400	26500 ± 6000	32000 ± 5000
"Припять" (плотность загрязнения почвы 13000 кБк/м <sup>2</sup> )				
Зеленушка	287000 ± 30500	174600 ± 27000	160000 ± 45000	180700 ± 4900
"Чернобыль-2" (плотность загрязнения почвы 4000 кБк/м <sup>2</sup> )				
Волнушка	19700 ± 2000	7000 ± 3000	11100 ± 3500	8800 ± 858
Свинушка тонкая	225000 ± 21000	31200 ± 7800	57000 ± 15400	68800 ± 2900
"Черевач" (плотность загрязнения почвы 2000 кБк/м <sup>2</sup> )				
Зеленушка	3000 ± 500	1300 ± 500	1000 ± 400	1200 ± 140

В целом мы считаем, что расхождение мнений по вопросам концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в шляпках и ножках макромицетов по мере их развития, по всей видимости, обусловлено возможными потерями спороносного слоя гименофора при отборе полнозрелых плодовых тел.

Длительное время дискуссионным также оставался вопрос о концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в грибном мицелии. Ряд авторов придерживался мнения, что мицелий является депо по отношению к этому радионуклиду, что в последующем обуславливает загрязнение плодовых тел [17]. Точка зрения других исследователей по этому вопросу прямо противоположна: плодовые тела в большей степени обогащены  $^{137}\text{Cs}$  по аналогии с его неизотопным химическим аналогом - калием [18]. В целом эти расхождения были связаны с тем, что в нативных условиях, как уже отмечалось, достаточно сложно провести отбор проб мицелия (микоризы) грибов с точной идентификацией его по видам. Сложность работ подобного рода и стремление их упростить привели к существенным ошибкам в оценке уровней накопления  $^{137}\text{Cs}$  в мицелии. Так, в ряде исследований отбор субстрата для получения мицелия проводили после удаления опада и лесной подстилки в местах сбора плодовых тел [19]. Это привело к занижению величин удельной активности мицелия, поскольку, как известно, основная масса грибной микоризы и мицелия сосредоточена именно в лесной подстилке. Кроме того, не проводилась идентификация принадлежности мицелия к определенным видам грибов, что не исключает возможности определения активности мицелия принципиально других групп грибов. В более поздних исследованиях, где удалось идентифицировать микоризу, отобранную в нативных условиях, и не были допущены вышеуказанные ошибки, в прямых измерениях было показано, что концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах и микоризе данного вида грибов приблизительно одинакова [20]. Это хорошо согласуется с данными наших прямых измерений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах и мицелии *Suillus luteus* (L.: Fr.) S.F.Gray). Они показали, что удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в мицелии и плодовых телах макромицетов практически не отличается. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в различных частях плодовых тел и мицелии масленка обыкновенного (*Suillus luteus* (L.: Fr.) S.F.Gray) составляла: в гименофоре -  $13000 \pm 1000$ , в шляпках -  $3000 \pm 1200$ , в ножках -  $4600 \pm 700$ , в мицелии -  $3500 \pm 400$ , целиком -  $3500 \pm 900$  Бк/кг сырой массы; плотность загрязнения почвы  $13000$  кБк/м<sup>2</sup>.

Полученные результаты позволяют предположить, что в зависимости от вида макромицетов, а следовательно, от места локализации мицелия в почве, его удельная активность будет различаться в таких же пропорциях, в которых различается удельная активность плодовых тел.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что, по-видимому, наибольшая близость соотношения  $^{137}\text{Cs}$  в мицелии и плодовых телах грибов отмечается в случаях, когда мицелий расположен вблизи плодового тела (как в случае отбора проб в настоящих исследованиях). В то же время удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в мицелии, сформированном на удалении от него, теоретически может отличаться от таковой в плодовых телах, что обусловлено вариациями концентрации данного радионуклида в почве. Для подтверждения высказанной гипотезы требуется проведение дополнительных специальных исследований.

Таким образом, проведенные исследования показали, что концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах и микоризе грибов практически одинакова. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах неоднозначно и меняется по мере их развития: у молодых особей различия в удельной активности шляпок и ножек минимальны, по мере созревания плодовых тел эти различия нарастают за счет накопления  $^{137}\text{Cs}$  в гименофоре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B., Klyashtorin A.L. Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems. - М.: Nauka, 2001. - 235 p.
2. Жизнь растений: В 7 т. - М.: Просвещение, 1991. - Т. 2: Грибы. - 480 с.
3. Дермек А. Грибы. - Братислава: Словарт, 1989. - 229 с.
4. Беккер З.Э. Физиология грибов и их практическое использование. - М.: Изд-во МГУ, 1963. - 269 с.
5. Guillitte O., Fraiture A., Lambinon J. Soil-fungi radiocesium transfer in forest ecosystems // Transfer of Radionuclides in Natural and Semi-Natural Environment / Ed. by G. Desmet et al. - London - New-York: Elsevier Applied Science, 1990. - P. 468 - 476.

6. Шубин В.И. Экологические ниши и сукцессии макромицетов-симбиотрофов в лесных экосистемах таежной зоны // Микология и фитопатология. - 1998. - Т. 32, вып. 6. - С. 32 - 37.
7. Ruhm W., Kammerer L., Hiersche L., Wirth E. The Cs-137/Cs-134 Ratio in Fungi as an Indicator of the Major Mycelium Location in Forest Soil // J. Envir. Radioact. - 1997. - Vol. 35, No. 2. - P. 129 - 148.
8. Yoshida S., Maramatsu Y. Radiocesium Concentrations in Mushrooms Collected in Japan // J. Envir. Radioact. - 1994. - Vol. 22. - P. 141 - 154.
9. Guillitte O., Giovani C., Klemt E. An overview of the role of fungi in the radiocaesium pathway within forests and from forest to man // International Conf. "Ten years after Chernobyl catastrophe". - Minsk (Belarus), 1996. - P. 66 - 72.
10. Guillite O., Melin J., Wallberg L. Biological pathways of radionuclides originating from the Chernobyl fallout in a boreal ecosystem // Sci. Total. Environ. - 1994. - Vol. 157. - P. 207 - 215.
11. Цветнова О.Б., Щеглов А.И. Аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  высшими грибами и их роль в биогеохимической миграции нуклида в лесных экосистемах // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. - 1996. - № 4. - С. 59 - 69.
12. Цветнова О.Б., Шатрова Н.Е., Щеглов А.И. Накопление радионуклидов и тяжелых металлов грибным комплексом лесных экосистем // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. - 2001. - № 3 (5). - С. 171 - 176.
13. Горленко М.В., Бондарцева М.А., Гарибова Л.В. и др. Грибы СССР. - М., 1984.
14. Инструктивно-методические указания по определению радиоактивности в объектах ветнадзора. М.: Колос, 1975. - 47 с.
15. Bakken L.R., Olsen R.A. Accumulation of radiocesium in fungi // Canadian Journal of Microbiology. - 1990. - Vol. 36 (10). - P. 704 - 710.
16. Ипатьев В.А., Багинский В.Ф., Булавик И.М. и др. Лес. Чернобыль. Человек. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации. - Гомель, 1999. - 454 с.
17. Dighton J., Horrill A.D. Radiocaesium accumulation in the mycorrhizal fungi *Lactarius rufus* and *Inocybe logicystis* in upland Britain following the Chernobyl accident // Trans. Brit. Mycol. Soc. - 1988. - Vol. 91, No. 2. - P. 335 - 337.
18. Matikhin S.V., Merculova L.N. On the method of calculation of mushroom contribution to the total contamination of ecosystems by  $^{137}\text{Cs}$  // U. I. R. Newsletter. - 1999. - No. 29. - P. 9 - 10.
19. Йохансон К.Й., Вінничук М.М., Долгілевич М.Й. Акумуляція  $^{137}\text{Cs}$  в міцелії грибів лісових екосистем України // Вісник ДААУ. - 1998. - № 2. - С. 27 - 30.
20. Nicolova I., Johanson K.J., Dahlberg A.  $^{137}\text{Cs}$  in fruitbodies and mycorrhizae in Ectomycorrhizal fungi // J. Environmental Radioactivity. - 1999. - Vol. 37, No. 1. - P. 115 - 125.

### ДО ПИТАННЯ ПРО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ $^{137}\text{Cs}$ У КОМПОНЕНТАХ ГРИБНОГО КОМПЛЕКСУ

О. Б. Цветнова, Н. Е. Зарубина

На основі довгострокових натурних спостережень в основних типах лісових екосистем Українського Полісся (30-кілометрова зона ЧАЕС) встановлено особливості розподілу  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах грибного комплексу. Показано, що концентрація  $^{137}\text{Cs}$  в плодових тілах і мікоризі грибів практично однакова. Розподіл  $^{137}\text{Cs}$  в плодових тілах змінюється з їх розвитком: у молодих особин відмінності в питомій активності шапок і ніжок мінімальні, із дозріванням плодових тіл ці відмінності збільшуються за рахунок накопичення  $^{137}\text{Cs}$  в гіменофорі.

### TO THE QUESTION ON $^{137}\text{Cs}$ DISTRIBUTION IN COMPONENTS OF FUNGI COMPLEX

O. B. Tscvetnova, N. E. Zarubina

Peculiarities of  $^{137}\text{Cs}$  distribution in components of fungi complex were determined on the basis of long term investigation. It was shown that the concentration of  $^{137}\text{Cs}$  in fruit bodies and mycorrhiza of fungi is practically equal.  $^{137}\text{Cs}$  distribution in fruit bodies is changing due to their development: differences in specific activity of stipes and caps of young individuals is minimum; differences increase as fruit bodies matured due to  $^{137}\text{Cs}$  accumulation in hymenophore.

Поступила в редакцію 21.02.03,  
после доработки – 08.07.03.