

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ГРИБНЫМ КОМПЛЕКСОМ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ *

О. Б. Цветнова¹, Н. Е. Шатрова, А. И. Щеглов¹¹ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия*

В нативных условиях лесных экосистем России и Украины, подвергшихся радиоактивному загрязнению, были проведены комплексные исследования по оценке роли микобиоты в биогеохимической миграции тяжелых металлов (ТМ), радионуклидов и их стабильных изотопных и неизотопных аналогов (1988 – 2000 гг.). Показано, что одним из основных факторов, определяющих накопление ¹³⁷Cs грибами, является их видовая принадлежность. В ряду грибов-концентраторов в настоящее время свои биоиндикаторные свойства в полной мере проявляют только гриб польский, масленок обыкновенный и желчный гриб. Не выявлено также значимых различий в концентрации ¹³⁷Cs между отдельными частями плодовых тел грибов, молодыми и старыми особями. Установлена высокая пространственная вариабельность содержания ¹³⁷Cs в грибах и значительно меньшая для ТМ. Вклад грибного комплекса в биогеохимическую миграцию элементов-загрязнителей меняется в зависимости от химической природы элемента и почвенно-экологических условий. Наибольших величин он достигает для ¹³⁷Cs, особенно в условиях гидроморфных ландшафтов и хвойных ценозов (до 50 %).

В последнее время появилось много публикаций, посвященных изучению поведения радионуклидов в лесных экосистемах, свидетельствующих о высоком вкладе грибного комплекса в общее загрязнение биогеоценоза (БГЦ), который в ряде случаев (в зависимости от почвенно-геохимических условий) превышает вклад высших растений [1 - 4].

Целью настоящих исследований является установление изменений в аккумулярующей роли грибов по истечении 15 лет после чернобыльских выпадений. Выводы представлены на основании результатов исследований, проводимых с 1988 по 2000 г. в основных типах лесных БГЦ территорий Украины (Чернобыльская зона отчуждения) и России (Тульская, Калужская, Брянская, Смоленская области), подвергшихся радиоактивному загрязнению. Предыдущие наработки показали, что на начальных этапах после выпадений грибы являются абсолютными аккумуляторами ¹³⁷Cs в лесном БГЦ. Кратность различий по этому показателю между грибным комплексом и другими компонентами БГЦ составляет 1 - 2, а по сравнению с древесиной – 3 порядка [1 - 4]. Было также установлено, что интенсивность поглощения цезия грибами гораздо выше, чем калия. С одной стороны, это свидетельствует о селективном поглощении ¹³⁷Cs, с другой - о неправомерности проведения аналогий между поглощением ¹³⁷Cs и К грибами. Аналогичная радиоцезию селективность в поглощении отмечается и для его стабильного изотопа - ¹³³Cs. Так, концентрация ¹³³Cs в грибах в несколько раз превосходит содержание этого элемента в почвах.

В настоящее время аккумуляция ¹³⁷Cs в грибах по-прежнему превышает таковую в древесном и травяно-кустарничковом ярусах, хотя величина этих различий уменьшилась, в частности по сравнению с древесиной почти в 10 раз. Для других структур древостоя и травянистой растительности эти изменения менее значимы или остались в прежних пределах. Можно лишь подчеркнуть, что в абсолютном выражении сглаживание различий между грибным комплексом и компонентами БГЦ в большей степени характерно для хвойных ценозов в сравнении с лиственными.

Одним из основных факторов, определяющих накопление ¹³⁷Cs грибами, по-прежнему является их видовая принадлежность. Межвидовые вариации накопления ¹³⁷Cs в грибах максимальны среди других компонентов БГЦ. Среди доминирующих видов грибов

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 00-04-48024).

на исследуемых территориях различия по этому признаку достигают 1 - 2 порядков (табл. 1). Это в значительной степени связано с принадлежностью их к различным экологическим группам: симбиотрофам, сапротрофам, ксилотрофам. Минимальной концентрацией характеризуются представители экологической группы сапротрофов (дождевик жемчужный (*Lycoperdon perlatum* Pers.), зонтик пестрый (*Macrolepiota procera* (Scop.: Fr.) Sing.) и др.). К ним примыкают виды из группы ксилотрофов (опенок осенний настоящий (*Armillariella melea* (Vahl: Fr.) P. Karst.), печеночница (*Fistulina hepatica* Schaeff.: Fr.) и др.). Более загрязнены виды-симбиотрофы (масленок обыкновенный (*Suillus luteus* (L.: Fr.) S.F.Gray), польский гриб (*Xerocomus badius* (Fr.) Kuhn. ex Gilb.) и др.). Все это связано со значительными вариациями глубины залегания грибного мицелия, т. е. с приуроченностью его к различным по степени загрязнения слоям органоминеральной толщи почв.

Данные таблиц приведены для полигонов, названия которых соответствуют названию ближайших населенных (отселенных) пунктов. Например, полигон "Янов" находится в непосредственной близости от бывшего населенного с. Янов, полигон "Опачичи" – от с. Опачичи и т.д.

Таблица 1. Содержание ^{137}Cs в грибах разных видов на территории Чернобыльской зоны отчуждения в 2000 г., Бк/кг сырой массы (усредненные данные)

Вид	Удельная активность
"Янов"	
Польский гриб (<i>X. badius</i>)	1100000 ± 90000
Масленок обыкновенный (<i>S. luteus</i>)	600000 ± 50000
Дождевик жемчужный (<i>L. perlatum</i>)	6000 ± 800
"Красно"	
Польский гриб (<i>X. badius</i>)	200000 ± 15000
Масленок обыкновенный (<i>S. luteus</i>)	210000 ± 11000
Дождевик жемчужный (<i>L. perlatum</i>)	700 ± 90
"Ново-Шепеличи"	
Польский гриб (<i>X. badius</i>)	58000 ± 3000
Масленок обыкновенный (<i>S. luteus</i>)	61000 ± 5000
Дождевик жемчужный (<i>L. perlatum</i>)	1600 ± 100
"Залесье"	
Польский гриб (<i>X. badius</i>)	40000 ± 4000
Масленок обыкновенный (<i>S. luteus</i>)	37000 ± 2000
Дождевик жемчужный (<i>L. perlatum</i>)	800 ± 70
"Опачичи"	
Польский гриб (<i>X. badius</i>)	9000 ± 800
Масленок обыкновенный (<i>S. luteus</i>)	23000 ± 1900
Дождевик жемчужный (<i>L. perlatum</i>)	200 ± 30

Другим не менее важным фактором, определяющим накопление радионуклидов грибами, являются условия их произрастания. Прослеживается довольно тесная положительная корреляция между степенью гидроморфизма почв и величиной содержания радионуклидов в грибах. Так, виды, развивающиеся на гидроморфных лесных почвах аккумулятивных ландшафтов, накапливают на порядок больше ^{137}Cs , чем те же виды, произрастающие на автоморфных почвах элювиальных ландшафтов. Оценка влияния некоторых других свойств почв, определяющих миграционную подвижность радионуклидов (мощность лесной подстилки, содержание гумуса, рН солевой и водный, содержание обменных кальция, магния, калия) на накопление их грибами, показало, что коэффициенты корреляции между исследуемыми свойствами почв и содержанием ^{137}Cs в грибах, как правило, незначимы или значимы с невысокой вероятностью. Наиболее высокие

коэффициенты корреляции отмечаются между мощностью подстилки и накоплением ^{137}Cs грибами. Отсутствие же достоверных (с высокой вероятностью) коэффициентов корреляции, вероятно, связано с невозможностью охвата всей площади питания грибов и значительной пространственной неоднородностью загрязнения почв ^{137}Cs даже в пределах ограниченных участков. Вместе с тем все полученные величины коэффициентов корреляции имеют отрицательный знак. Это свидетельствует об однонаправленном влиянии одного какого-то фактора, для выявления которого требуется проведение дополнительных исследований.

Для конкретизации особенностей накопления ^{137}Cs в компонентах грибного комплекса было произведено определение его содержания в мицелии, плодовых телах (молодых и старых), а также отдельно в шляпках и ножках.

Исследованиями установлено, что в целом концентрация ^{137}Cs в мицелии грибов близка к таковой в плодовых телах. Например, содержание этого нуклида в мицелии масленка обыкновенного (*S. luteus*), отобранного на территории полигона "Припять" в 1999 г. составляло 3500 ± 400 , в пробах плодовых тел "целиком" – 3500 ± 900 Бк/кг сухой массы. При этом отмечаются определенные вариации как в ту, так и в другую стороны. Причины данных колебаний остаются до конца неясными. Можно предположить, что они связаны с гетерогенностью самого мицелия, видовыми особенностями накопления ^{137}Cs отдельными группами грибов и с методическими ошибками при отборе мицелия определенных грибных видов. Все это также требует проведения дополнительных специальных исследований.

Не было выявлено значимых различий в концентрации ^{137}Cs в ножках и шляпках плодовых тел грибов. Повышенное содержание этого нуклида отмечается лишь в гименофоре (табл. 2).

Таблица 2. Содержание ^{137}Cs в разных частях плодовых тел грибов в 2000 г. на территории Чернобыльской зоны отчуждения, Бк/кг сырой массы (усредненные данные)

Вид	Гименофор	Шляпки	Ножки	Целиком
"Куповатое"				
Горькушка (<i>Lactarius rufus</i> Fr.)	44500 ± 3500	15300 ± 5000	19800 ± 4000	21600 ± 1400
"Лелев"				
Зеленушка (<i>Tricholoma flavovirens</i> (Pers.: Fr.) Lund.)	45600 ± 3000	11700 ± 4300	11800 ± 4500	16000 ± 2000
Свинушка тонкая (<i>Paxillus involutus</i> (Batsch: Fr.) Fr.)	56000 ± 4700	25800 ± 6600	21000 ± 5000	29000 ± 4900
"Зимовище"				
Волнушка (<i>Lactarius torminosus</i> (Schaeff.: Fr.) S.F.Gray)	31400 ± 3500	21600 ± 5000	17000 ± 5000	18000 ± 3400
Подберезовик (<i>Leccinum scabrum</i> (Bull.: Fr.) S.F.Gray)	45000 ± 3300	21100 ± 5400	26500 ± 6000	32000 ± 5000
"Припять"				
Зеленушка	287000 ± 30500	174600 ± 27000	160000 ± 45000	180700 ± 4900
"Чернобыль-2"				
Волнушка	19700 ± 2000	7000 ± 3000	11100 ± 3500	8800 ± 858
Свинушка тонкая	225000 ± 21000	31200 ± 7800	57000 ± 15400	68800 ± 2900
"Черевач"				
Зеленушка	3000 ± 500	1300 ± 500	1000 ± 400	1200 ± 140

Также установлено, что существенных различий в удельной активности ^{137}Cs в молодых (1 – 2-дневных) и старых (10-дневных) плодовых телах не наблюдается (табл. 3).

Таблица 3. Содержание ^{137}Cs в разных по возрасту плодовых телах грибов на территории Чернобыльской зоны отчуждения в 2000 г., Бк/кг сырой массы (усредненные данные)

Вид	Молодые плодовые тела		Старые плодовые тела	
	Среднее значение	Стандартная ошибка	Среднее значение	Стандартная ошибка
“Припять”				
Зеленушка	200000	21000	174000	19000
“Парышев”				
Зеленушка	2500	700	3300	400
Рядовка коричневая (<i>Tricholoma imbricatus</i> (Fr.: Fr.) Kumm.)	2200	600	2500	500

В ряду грибов лесных БГЦ по накопительной способности ^{137}Cs выделяется гриб польский, свинушка тонкая, горькушка, желчный гриб (*Tylopilus felleus* (Bull.: Fr.) Karst.), масленок обыкновенный. Путем сопоставления рядов накопления ^{137}Cs грибами, полученных по результатам исследований 2000 г., с таковыми, полученными ранее (1988 - 1990 гг.), было выявлено, что из видов-накопителей (масленок обыкновенный, польский гриб, горькушка, свинушка тонкая) только польский гриб и масленок обыкновенный в полной мере сохраняют свои биоиндикаторные свойства [5, 6]. В настоящее время свинушка тонкая не может служить достоверным биоиндикатором. Это, видимо, связано с тем, что данный вид относится к двум экологическим группам грибов - сапротрофам и факультативным микоризообразователям, т.е. в зависимости от условий произрастания, принадлежит к той или другой группе. На начальных этапах после выпадений, когда загрязнение локализовалось в поверхностных слоях, роль этого вида как биоиндикатора радиоактивного загрязнения была весьма значима. По данным на 2000 г., к числу видов-биоиндикаторов может быть причислен желчный гриб, аккумуляция ^{137}Cs в котором по величине уступает только польскому грибу. Накопление ^{137}Cs данным видом может в 100 раз превышать его аккумуляцию другими видами грибов, произрастающих в пределах данного экотопа. Относительно желчного гриба практически нет сведений, поэтому остается неясным вопрос об особенностях аккумуляции им ^{137}Cs на начальных этапах после выпадений.

Исследованиями было установлено, что в сравнении с ^{137}Cs роль грибного комплекса в поглощении других радионуклидов, таких как стронций и плутоний, невелика. Грибы не способны к аналогичной ^{137}Cs аккумуляции ^{90}Sr и изотопов Pu ($^{238-240}\text{Pu}$). Нашими исследованиями и по данным литературы [7 - 9] было установлено, что грибы накапливают на 3 порядка меньше ^{90}Sr , чем ^{137}Cs . В еще меньшей степени грибы поглощают изотопы плутония.

Наши исследования накопления грибами тяжелых металлов (ТМ), таких как свинец, цинк, кадмий, медь, показали, что грибы не характеризуются столь высокой аккумулярующей способностью по отношению к ТМ, как к ^{137}Cs . Вариации содержания ТМ в грибах несравнимо меньше, чем таковые для ^{137}Cs . Так, для ТМ они не превышают 2-кратных величин, в то время как для ^{137}Cs (при одной плотности загрязнения) достигают 2 порядков. Несколько более высокие вариации в накоплении ТМ грибами наблюдаются при их произрастании в различных экотопах. Исходя из особенностей накопления ТМ грибами, ранжирование различных видов по их накопительной способности и выделение биоиндикаторов не столь значимо, как для ^{137}Cs . Накопление ТМ грибами очень тесно коррелирует с содержанием подвижных форм этих элементов в почвах и слабо с

содержанием их валовых форм. Видимо, грибы не способны или мало способны к усвоению труднорастворимых валовых форм ТМ. Еще одним фактором, определяющим накопление ТМ грибами, как уже отмечалось, являются условия их произрастания. Установлено, что грибы лесных БГЦ аккумулятивных ландшафтов накапливают в 1,5 - 2 раза больше ТМ, чем те же виды, произрастающие в условиях автоморфных ландшафтов. Совокупный анализ полученных коэффициентов накопления (КН, Бк/кг/Бк/кг) ^{137}Cs , его стабильного изотопа и ТМ (КН, мг/кг/мг/кг) показал, что КН этих элементов грибами различны. КН ^{137}Cs и ^{133}Cs больше 1, что подтверждает селективный характер их поглощения из почвы. ^{137}Cs и ^{133}Cs являются элементами биологического накопления [10]. КН исследуемых ТМ грибами по абсолютной величине близки между собой и равняются приблизительно 1, что позволяет отнести их к группе элементов биологического захвата [10].

Многолетняя динамика накопления ^{137}Cs грибами характеризуется общим трендом снижения коэффициентов перехода (КП, Бк/кг/кБк/м²). Однако это снижение достаточно плавное. За истекшие 15 лет величина КП ^{137}Cs в отдельные виды грибов снизилась в 1,5 – 6 раз в зависимости от видовой принадлежности и типа БГЦ.

Выводы

Предварительный расчет вклада грибного комплекса в аккумуляцию ^{137}Cs в лесном БГЦ показал, что в зависимости от ландшафтных условий в нем удерживается до 50 % суммарных запасов этого радионуклида в экосистеме. Максимальный вклад грибного комплекса отмечается в гидроморфных ландшафтах и хвойных ценозах и минимальный (до 5 %) - в лиственных ценозах автоморфных ландшафтов. Для ^{90}Sr и изотопов плутония роль грибного комплекса в биогеохимических циклах минимальна среди всех других компонентов БГЦ (<< 1 %), причем независимо от ландшафтных условий. Вклад грибного комплекса в аккумуляцию ТМ в лесных экосистемах по сравнению с таковым ^{137}Cs ниже, он не превышает 1 %. Однако сделанные расчеты следует считать предварительными, они требуют статистического подтверждения.

В целом полученные данные свидетельствуют о сохранении, а в определенных условиях даже возрастании роли грибного комплекса в биогеохимической миграции ^{137}Cs в лесных экосистемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветнова О.Б., Щеглов А.И. Аккумуляция ^{137}Cs высшими грибами и их роль в биологической миграции нуклида в лесных экосистемах // Вестник МГУ. Сер. почвоведение (17). - 1996. - № 4. - С. 59 – 69.
2. Щеглов А.И., Тихомиров Ф.А., Цветнова О.Б. и др. Биогеохимия радионуклидов чернобыльского выброса в лесных экосистемах Европейской части СНГ // Радиационная биология. Радиоэкология. - 1996. - Т. 36, вып. 4. - С. 469 – 478.
3. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах. - М.: Наука, 1999. - С. 268.
4. Tsvetnova O.B., Shcheglov A.I. ^{137}Cs content in the mushrooms of radioactive contaminated zones of European part of CIS // The Science of Total Environment. - 1995. - Vol. 155. - P. 25 – 29.
5. Коваль Г.М., Шатрова Н.С. Вміст радіонуклідів аварійного походження у грибах (макроміцетах) Чорнобильської зони відчуження // Чорнобиль. Зона відчуження. - Київ.: Наук. думка, 2001. - С. 378 – 407.
6. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / Под ред В.А. Ипатьева. - Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. - С. 137 – 145.
7. Wirth E., Kammerer L. Cycling of cesium and strontium in coniferous forest in South – Bavaria // The behaviour of Radionuclides in Natural and Semi-Natural Environments. Rome, Italy, 10 – 11 Feb., 1992. - P. 15 – 31.

8. Кучма М.Д., Архіпов М.П., Бідна С.М. Радіоекологічна та лісівнича ситуація в лісах зони відчуження // Наук.-практ. конф. "Наука. Чорнобиль-96": Збірка тез. - Київ, 1997. - С. 53 - 54.
9. Федоров В.Н. Sr-90 в плодовых телах высших макромицетов // Тез. докл. 2-го радиобиолог. съезда (Киев, 20 - 25 сент. 1993 г.). - Пушино, 1993. - Т. 2. - С. 1034 - 1035.
10. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. - М.: Высш. шк., 1975. - С. 342.

НАКОПИЧЕННЯ РАДІОНУКЛІДІВ ТА ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ГРИБНИМ КОМПЛЕКСОМ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ

О. Б. Цветнова, Н. Е. Шатрова, О. И. Щеглов

У нативних умовах лісових екосистем Росії й України, що підпали під радіоактивне забруднення, було проведено комплексні дослідження з оцінки ролі мікобіоти в біогеохімічній міграції важких металів (ВМ), радіонуклідів та їх стабільних ізотопних і неізотопних аналогів (1988 - 2000 рр.). Показано, що одним з основних чинників, що визначають накопичення ^{137}Cs грибами, є їхня видова приналежність. У ряду грибів-концентраторів у даний час свої біоіндикаторні властивості повною мірою виявляють тільки гриб польський, маслюк звичайний і жовчний гриб. Виявлено тісну позитивну кореляцію між ступенем гідроморфізму ґрунтів і розміром вмісту радіонуклідів та ВМ у грибах. Концентрація ^{137}Cs у мицелії грибів близька до такої в плодовых тілах. Не виявлено також значимих розходжень у концентрації ^{137}Cs між окремими частинами плодовых тіл грибів, молодими і старими особами. Встановлено високу просторову варіабельність утримання ^{137}Cs у грибах і значно меншу для інших радіонуклідів та ВМ. Внесок грибного комплексу в біогеохімічну міграцію елементів-забруднювачів змінюється залежно від хімічної природи елемента й ґрунтово-екологічних умов. Найбільших розмірів він досягає для ^{137}Cs , особливо в умовах гідроморфних ландшафтів та хвойних ценозів (до 50 %).

THE ACUMULATION OF RADIONUCLIDES AND HEAVY METALS BY MUSHROOM'S COMPLEX IN FORESTRY ECOSYSTEMS

O. B. Tsvetnova, N. E. Shatrova, A. I. Shcheglov

Comprehensive studies of the mycobiota contribution to the biogeochemical migration of heavy metals (HM), radionuclides and their stable isotopic and non-isotopic carriers under native conditions have been carried out in contaminated forests of Russia and Ukraine (1988-2000). It was shown that species is a prime factor of ^{137}Cs accumulation by the fungi. The so-called "concentrator" group is now clearly represented by *Xerocomus badius*, *Suillus luteus* and *Tylopilus felleus*. ^{137}Cs content in the fungus mycelium is close to that in the fruit bodies. No significant difference in ^{137}Cs concentration was revealed depending on the fruit body part or age. Spatial variability of ^{137}Cs content in the fungi was considerably higher compared to other radionuclides and HM. The contribution of fungus complex to the biogeochemical migration of the various contaminants depends on both the chemical nature of the contaminant and soil-ecological conditions. The contribution is most manifested for ^{137}Cs , especially in hydromorphic landscapes (up to 50% of total accumulation in the biota).

Поступила в редакцію 26.02.01