

ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

УДК 582.287.23:574

Д. М. Иванов, М. А. Ефремова

ОЦЕНКА РАДИОАКТИВНОСТИ ПЛОДОВЫХ ТЕЛ ГРИБОВ РОДА *LECCINUM*, СОБРАННЫХ В РАЙОНЕ ГОРНОГО МАССИВА ХИБИНЫ

Введение

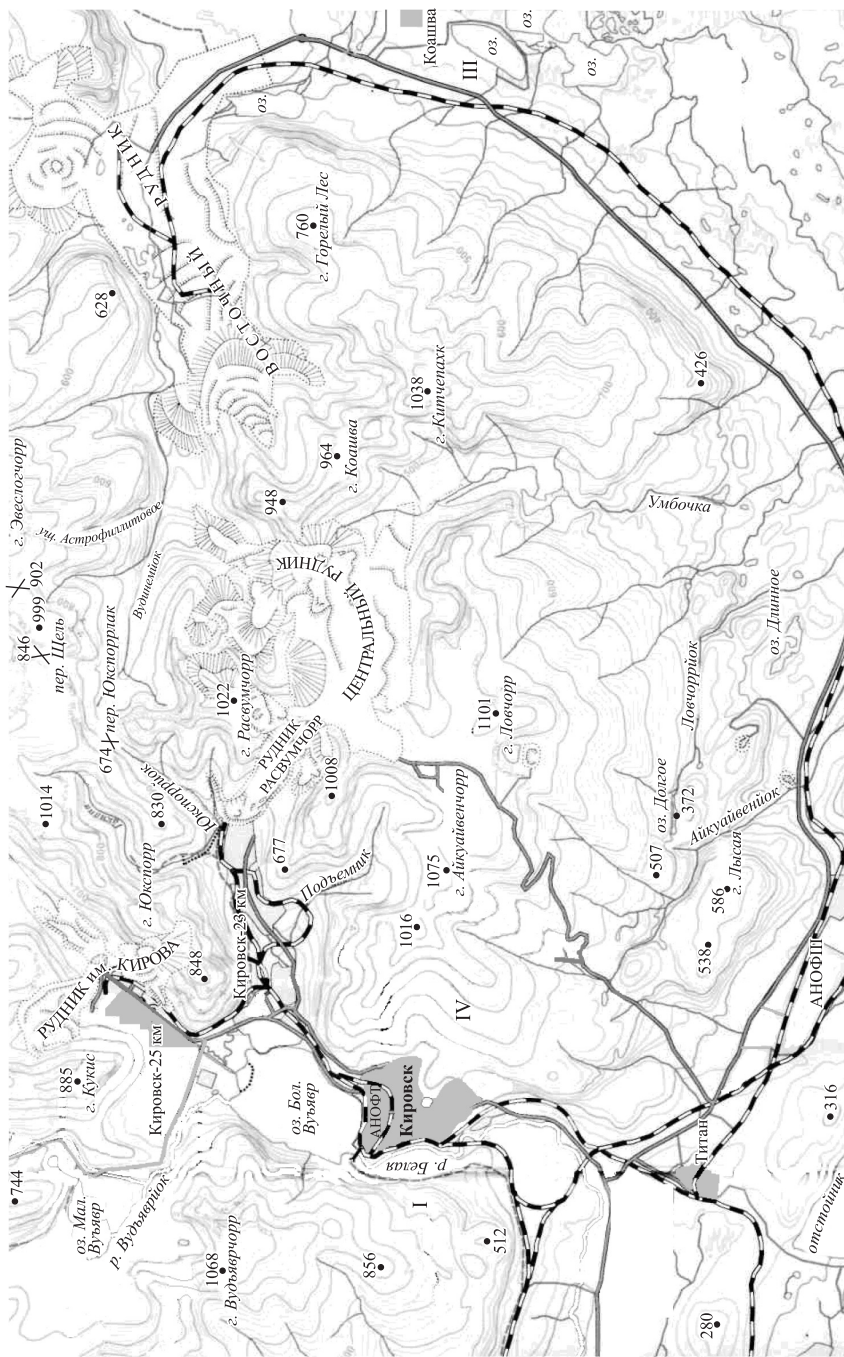
Для изучения филогенетических связей между видами эктомикоризообразующих грибов рода *Leccinum* S. F. Gray одним из районов сбора гербарных материалов был выбран горный массив Хибин.

Отечественный миколог Б. П. Васильков, автор классических работ по шляпочным грибам [1–3] и статей по изучаемому роду [4–7], отмечал, что: «наибольшее количество различных форм березовика на небольшой сравнительно территории нам приходилось наблюдать в горных лесах и в тундре Хибин» [7, с. 380].

В окрестностях г. Кировска Мурманской области на небольшой территории представлены три природных зоны: северная тайга, лесотундра и тундра. На склонах горного массива Хибин в распределении растительности выражена высотная поясность: редколесье из березы извилистой сменяется кустарничковой тундрой с участием карликовой березы.

В Хибинах расположены богатейшие залежи апатитов — фосфатной руды, содержащей повышенные концентрации естественных радионуклидов. Преобладающий вклад в загрязнение территории Кировско-Апатитского района вносят элементы: Al, Sr, Be, La, Y, U, Th, входящие в состав горных пород. При этом радиоактивному загрязнению окружающей среды способствуют ^{40}K и члены рядов ^{238}U и ^{232}Th . Наряду с ветровым переносом пыли, образующейся в результате естественных природных процессов, загрязнение происходит при добыче апатит-нефелиновых руд, хранении хвостов их переработки и длительных перевозках концентратов вдоль основных транспортных магистралей, показанных на рисунке. В оз. Большой Вудъявр также сбрасываются шахтные воды, содержащие соединения азота, фториды, фосфаты, взвешенные вещества и нефтепродукты [8]. В г. Кировске расположена первая апатит-нефелиновая обогатительная фабрика (АНОФ I) (см. рисунок), которая с 1931 г. до ввода в эксплуатацию в 1963 г. АНОФ II в г. Апатиты была единственным местом производства апатитового концентрата.

В связи с обнаружением превышения допустимого уровня радионуклидов в плодовых телах *Leccinum holopus* (Rostk.) Watling — Подберезовика болотного, — сопровождающегося изменением морфологических признаков [9], было необходимо проверить со-



Фрагмент карты. Хибинские гундры в окрестностях г. Кировска (в 1 см — 1 км)
 I–IV — места сбора плодовых тел грибов (соответствуют указанным в табл. 1, 2 и списку мест сбора в разд. «Материалы и методы исследования»); АНОФ — апатит-нефелиновая обогащательная фабрика.

держание радионуклидов в плодовых телах грибов, собранных в районе Хибин, и определить вносит ли этот параметр вклад в морфологическое разнообразие.

Актуальность проведения измерений обусловлена также тем, что подосиновики и подберезовики, наряду с другими дикорастущими съедобными грибами, широко используются населением как дополнительный источник питания. Проведение оценки радиоактивности грибов, собранных в районе горного массива Хибин, позволит провести сравнение как с данными по радиационной обстановке Мурманской области, так и других регионов.

Цель работы — оценить суммарную радиоактивность плодовых тел грибов рода *Leccinum*, собранных в районе горного массива Хибин, и выявить вклад различных радионуклидов в ее формирование.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- провести сбор плодовых тел грибов рода *Leccinum* в районе горного массива Хибин;
- определить концентрацию искусственных и естественных радионуклидов в плодовых телах грибов;
- определить коэффициенты накопления радионуклидов грибами.

Материалы и методы исследования

Гербарные материалы. Гербаризацию плодовых тел грибов проводили, придерживаясь классических рекомендаций [10]. Мясистые плодовые тела разрезали пополам сверху вниз. В случае крупных размеров шляпку разрезали на части толщиной 1–1,5 см. Затем высушивали в потоке теплого воздуха 35–40 °С на электрической сушилке «Суховей».

Для изучения микроскопических признаков использовался микроскоп МБИ 15-У4.2 окуляр 10^x, объективы 10^x, 40^x, 60^x, перемена увеличения 1^x, 1,6^x, 2,5^x.

Латинские названия таксонов приводятся по работе [11]. Материалом для исследования послужили плодовые тела, принадлежащие к следующим видам:

Leccinum versipelle (Fr. et Hök) Snell — Подосиновик желто-бурый;

Leccinum scabrum (Bull.: Fr.) S. F. Gray — Подберезовик обыкновенный;

Leccinum rotundifoliae (Singer) A. H. Sm., Thiers & Watling — Подберезовик «круглолистный».

Места сбора образцов. Перед описанием места сбора приведен его условный номер, используемый в табл. 1 и на рисунке. Сбор образцов проводился в Кировско-Апатитском р-не Мурманской обл. В скобках указаны географические координаты, определенные GPS навигатором eTrex пр-ва Garmin, точность 15 м, затем приведен тип лесного сообщества и даты сбора.

I — в окрестностях г. Кировска, подножие г. Вудъяврчорр, склон над местом пересечения р. Белая железнодорожным полотном, (N 67°37.049', E033°38.642', Н 340 м), береза извилистая, 06.08.2006;

II — по дороге от профилактория «Гирвас» к оз. Малый Вудъявр, старый карьер (N 67°39.580', E033°37.796', Н 357 м), береза извилистая, береза карликовая, ивы, 07.08.2006;

III — окрестности пос. Коашва (N 67°35.882', E034°09.248', Н 174 м), ель сибирская, береза извилистая, ивы, 09.08.2006;

IV — западный склон горы Айкуайвенчорр (N 67°36.352', E033°42.603', Н 602 м),

береза карликовая, полярные ивы, можжевельник сибирский, кустарнички: вороника, брусника, черника, линнея северная, арктоус альпийский, 08.08.2006 и 10.08.2006.

Измерение радиоактивности проб. Измерения радиоактивности были проведены для каждого гербарного образца на сцинтилляционном гамма-спектрометре МКГБ-01 «РАДЕК». Время измерения пробы не менее 1 ч.

Среднее значение по образцам получено для плодовых тел из одного местообитания (см. табл. 1, 2). Использованный метод спектроскопии позволяет выявить содержание в пробе естественных радионуклидов ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K и радиоиотопа искусственного происхождения ^{137}Cs .

Таблица 1. Средние значения суммарной радиоактивности грибов

Место сбора	Виды рода <i>Leccinum</i>	Измерено образцов	Q Бк/кг*
I	<i>L. scabrum</i>	1	696 ± 16
II	<i>L. scabrum</i> , <i>L. rotundifoliae</i>	16	1872 ± 811
III	<i>L. versipelle</i> , <i>L. scabrum</i>	11	1493 ± 505
IV	<i>L. scabrum</i> , <i>L. rotundifoliae</i>	10	6163 ± 3534

* Уровень значимости $p < 0,05$.

В радиоэкологии одним из основных показателей, характеризующих накопление радионуклидов в биологических объектах, является коэффициент накопления химического элемента (КН). Коэффициент накопления химического элемента — это отношение концентрации радионуклида в сухих грибах к его концентрации в сухой почве.

Таблица 2. Накопление радионуклидов в плодовых телах грибов

Место сбора	Радионуклид	Концентрация в почве, Бк/кг	Концентрация в грибах, Бк/кг	КН в грибах	Кислотность почвы*	
					pH(H ₂ O)	pH(KCl)
I	^{137}Cs	26,7 ± 3,3	696,0 ± 16,0	26,1	6,60	6,25
	^{40}K	н п/о	н п/о	н п/о		
	^{226}Ra	то же	то же	то же		
	^{232}Th	»	»	»		
II	^{137}Cs	26,7 ± 3,3	»	»	6,60	6,25
	^{40}K	497,7 ± 57,0	1871,8 ± 810,7	3,8		
	^{226}Ra	н п/о	н п/о	н п/о		
	^{232}Th	то же	то же	то же		
III	^{137}Cs	73,0 ± 7,3	438,1 ± 20,6	6,0	7,33	6,15
	^{40}K	826,4 ± 83,0	1055,0 ± 484,7	1,3		
	^{226}Ra	7,0 ± 2,9	н п/о	н п/о		
	^{232}Th	31,8 ± 3,2	то же	то же		
IV	^{137}Cs	11,5 ± 0,6	532,6 ± 242,0	46,2	5,40	4,70
	^{40}K	595,6 ± 60,0	5630,0 ± 3292,2	9,5		
	^{226}Ra	26,0 ± 3,2	н п/о	н п/о		
	^{232}Th	21,8 ± 2,2	то же	то же		

Примечание. * — для характеристики активности почвы в местах сбора грибов I и II использован один и тот же образец почвы; н п/о — ниже предела обнаружения.

Измерение рН почвы. В каждом из мест сбора II–IV рядом с плодовыми телами также были отобраны по три почвенные пробы. Измерения рН почвы проводили в водной рН(H₂O) и солевой (KCl 1 н, рН 5,6–5,8) рН(KCl) вытяжках (см. табл. 2). Для этого использовался преобразователь ионометрический И-500 ООО «НПО Аквилон».

Результаты исследований и их обсуждение

Кольский п-ов в геологическом плане относится к наиболее древней части Европы, однако природа региона довольно молода, так как здесь находился центр четвертичного оледенения, и последний ледник покинул эту территорию всего несколько тысяч лет назад. На растительность накладывает отпечаток молодость почвенного покрова. Близкое залегание кристаллических пород, являющихся водоупором, создает условия для заболачивания даже небольших понижений.

Хибины (Хибинские тундры) — небольшая горная страна между двумя крупнейшими озерами Кольского п-ва — Имандра и Умбозеро. Нижние склоны горного массива на высотах 150–400 м занимают смешанные леса из Ели сибирской (*Picea obovata* Ldb.) и Березы извилистой (*Betula tortuosa* Ldb.), сменяющиеся березовым криволесьем. С высоты 400–450 м простирается пояс тундры. Растительный покров хибинской тундры образуют Береза карликовая (*Betula nana* L.), полярные ивы и кустарнички: вороника, брусника, черника, линнея северная, арктоус альпийский. Сочетание высотной поясности и чередование в зависимости от нее различных микоризообразующих древесных пород являются удачным сочетанием условий, позволяющим на небольшой территории охватить разнообразие видов и экологических форм изучаемого рода.

В табл. 1 указана видовая принадлежность плодовых тел. Определение гербарных образцов уточнялось на основе методов анализа ДНК, поскольку виды рода *Leccinum* обладают перекрывающимися морфологическими и микроскопическими признаками. Морфологическое разнообразие увеличивало то, что некоторые образцы были собраны на каменистых россыпях и имели трещиноватую шляпку с подсушенной кожицей.

Определение образцов было подтверждено методом рестрикционного анализа областей ITS1-5,8S-ITS2 и IGS1 рибосомальной ДНК [12]. Собранные плодовые тела были отнесены к трем видам (см. разд. «Материалы и методы исследования»).

Интересно отметить, что собранные образцы подберезовиков, в которых определялась радиоактивность, принадлежали к двум видам *L. rotundifoliae* и *L. scabrum*. Причем первоначально, на основе изучения литературы [7], предполагалось, что все подберезовики, произрастающие совместно с березами карликовой и извилистой в районе Хибинских тундр, будут представлены видом *L. rotundifoliae*. Однако по результатам рестрикционного анализа рибосомальной ДНК [12] образцы подберезовиков разделились на две группы, которым соответствуют, по морфологическому описанию и массе образующихся фрагментов рДНК, *L. rotundifoliae* и *L. scabrum*.

Название *L. rotundifoliae* дословно следует переводить как «круглолистный», в смысле произрастающий совместно, т. е. образующий эктомикоризу с березой круглолистной *Betula rotundifolia* Spach. Данный вид впервые был описан Р. Зингером (Rolf Singer) в 1938 г. на Алтае, где он встречается совместно с березой круглолистной *Betula rotundifolia* Spach. [11].

Средние значения суммарной радиоактивности для образцов плодовых тел грибов из разных мест сбора приведены в табл. 1.

КН радионуклидов позволяет оценить их удельное накопление в грибах относительно концентрации в почве (табл. 2). КН — это высокопараметрический коэффициент, так как зависит от всех свойств почвы, биологического объекта, климатических условий, и поэтому в принципе не может быть определен постоянными величинами, а лишь системой величин, характеризующихся средними значениями и пределами вариации [13].

Анализ полученных результатов (см. табл. 1 и 2) показывает, что содержание радионуклидов в сухих плодовых телах грибов, собранных в районе горного массива Хибин, не превышает допустимый уровень, установленный СанПиН 2.3.2.1078-01. Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 [14] допустимый уровень содержания ^{137}Cs в сухих грибах составляет 2500 Бк/кг.

Шляпка с гименофором является местом максимальной концентрации радионуклидов в грибах [15]. Однако в нашем исследовании для измерения суммарной радиоактивности использовались все части высушенного плодового тела.

Загрязнение территории района ^{137}Cs не превышает 0,1 Ки/км², что соответствует средним значениям загрязнения выпадениями ^{137}Cs от ядерных взрывов в атмосфере до 1963 г. Отдельные небольшие участки повышенного загрязнения ^{137}Cs до 0,15 Ки/км² находятся в местах, где верхний слой почвы остался ненарушенным с 1960-х гг. [16]. Концентрации ^{137}Cs , а также других определяемых радионуклидов в приземной атмосфере на несколько порядков ниже установленных нормативными документами по радиационной безопасности. Данные по содержанию дозообразующих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в местных пищевых продуктах, в том числе и в дикорастущих съедобных грибах, в десятки раз меньше регламентируемых в СанПиН 2.3.2.1078-01 [17].

Результаты наших исследований показывают, что при незначительном загрязнении почвы ^{137}Cs его коэффициенты накопления в грибах различаются более чем в 7 раз (см. табл. 2). Следует отметить, что в районе пос. Коашва отмечается наиболее высокая концентрация радиоактивного цезия в почве и наименьший коэффициент его накопления грибами. По-видимому, это связано с наименьшей кислотностью почв данной местности в исследуемом регионе. Известно, что при увеличении кислотности возрастает подвижность ^{137}Cs в почве и его накопление растениями [18, 19]. Калий и цезий являются химическими элементами-аналогами, поэтому на поведение изотопов калия кислотность почвы оказывает такое же влияние. В плодовых телах грибов, выросших в Коашве, выявлены наименьшие коэффициенты накопления ^{40}K .

Значения величины рН почвы в местах сбора I–III (см. табл. 2) объясняются тем, что Хибин являются щелочным горным массивом. Кроме того, дополнительное ощелачивание почв в окрестностях озер, отстойников и дренажных канав может происходить в результате сброса карьерных вод, имеющих высокие значения рН 10 (ПДК — 9) [16]. На руднике «Восточный» Коашвинского апатит-нефелинового месторождения создана наиболее крупная водопонижительная система [16]. Сброс карьерных вод рудника «Восточный» производится в систему рек и озер, отмеченных на рисунке в окрестностях пос. Коашва.

Максимальные показатели накопления изотопов калия и цезия выявлены в грибах, собранных на западном склоне г. Айкуайвенчорр, где почвы обладают повышенной кислотностью. Суммарная радиоактивность плодовых тел грибов здесь в 3,3–8,9 раза больше, чем в других местах сбора (см. табл. 1).

Содержание в грибах естественных радионуклидов ^{226}Ra и ^{232}Th достоверно не зафиксировано. По-видимому, они прочно сорбированы в почве, а доля их подвижных форм незначительна.

Заключение

Концентрация ^{137}Cs , а также других определяемых радионуклидов в плодовых телах грибов рода *Leccinum*, собранных в районе горного массива Хибины, находится в пределах установленных допустимых значений.

Коэффициенты накопления ^{137}Cs и ^{40}K в плодовых телах грибов зависят от кислотности почвы. При изменении $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ почвы от 5,40 до 7,33 коэффициенты накопления радионуклидов в грибах убывают более, чем в 7 раз.

* * *

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №10-04-01190-а).

Литература

1. Васильков Б. П. Очерк географического распространения шляпочных грибов в СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 86 с.
2. Васильков Б. П. Изучение шляпочных грибов в СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1953. 192 с.
3. Васильков Б. П. Белый гриб: опыт монографии одного вида. М.; Л.: Наука, 1966. 132 с.
4. Васильков Б. П. К систематике осиновика *Boletus versipellis* Fr. // Советская ботаника. 1944. № 2. С. 21–27.
5. Васильков Б. П. Опыт изучения вида у шляпочных грибов на примере осиновика — *Krombholzia aurantiaca* (Roques) Glib. // Бот. журн. 1954. Т. 39, № 5. С. 681–693.
6. Васильков Б. П. Систематический обзор осиновика *Krombholzia aurantiaca* (Roques) Glib. и его форм, встречающихся в СССР // Ботанические материалы Отдела споровых растений Ботанического института им. В. Л. Комарова Академии Наук СССР. 1956. Т. XI. С. 134–140.
7. Васильков Б. П. Березовик — *Krombholzia scabra* (Fr.) Karst. — в СССР // Тр. Бот. ин-та АН СССР. Сер. II. 1956. Вып. 10. С. 367–384.
8. Годовой отчет — 1998. Государственный комитет по охране окружающей среды Мурманской области [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gov-murman.ru/envcond/1998.pdf> (дата обращения: 21.02.2012).
9. Иванов Д. М., Ефремова М. А. Оценка суммарной бета-активности в плодовых телах грибов рода *Leccinum*, произрастающих в лесных и болотных экосистемах Ленинградской области // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 3: Биология. 2012. Вып. 2. С. 55–61.
10. Бондарцев А. С., Зингер Р. А. Руководство по сбору высших базидиальных грибов для научного их изучения. Споровые растения // Тр. Бот. ин-та АН СССР. Сер. II. 1950. Вып. 6. С. 499–543.
11. Den Bakker H. C., Noordeloos M. E. A revision of European species of *Leccinum* Gray and notes on extralimital species // Persoonia. 2005. Vol. 18. P. 511–587.
12. Иванов Д. М. Анализ областей ITS1-5,8S-ITS2 и IGS1 рДНК видов рода *Leccinum* // Материалы V Междунар. конф. «Изучение грибов в биогеоценозах». Пермь, 2009. С. 93–97.
13. Дричко В. Ф., Цветкова В. В. Сорбционная модель поступления радионуклидов из почвы в растения // Почвоведение. 1990. № 10. С. 35–40.
14. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов // Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.1078-01. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ 6 ноября 2001 г., с изменениями от 31 мая 2002 г., 20 августа 2002 г., 15 апреля 2003 г.

15. Щеглов А. И., Цветнова О. Б. Грибы — биоиндикаторы техногенного загрязнения // Природа. 2002. № 11. С. 39–46.

16. Годовой отчет — 1997. Государственный комитет по охране окружающей среды Мурманской области [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gov-murman.ru/envcond/1997.pdf> (дата обращения: 21.02.2012).

17. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2010 году. Мурманск: ООО «Рекламное агентство XXI век», 2011. 152 с.

18. Юдинцева Е. В., Гулякин И. В. Агрохимия радиоактивных изотопов стронция и цезия. М.: Атомиздат, 1968. 472 с.

19. Алексахин Р. М., Моисеев И. Т., Тихомиров Ф. А. Агрохимия ^{137}Cs и его накопление сельскохозяйственными растениями // Агрохимия. 1977. № 2. С. 129–142.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2012 г.