

**МАКРОМИЦЕТЫ КАК БИОИНДИКАТОРЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТЕРРИТОРИИ  
г. КРАСНОЯРСКА И ЕГО ОКРЕСТНОСТЕЙ**

Изучен элементный состав 16 видов макромицетов (шляпочные и трутовые грибы) на территории г. Красноярск (Академгородок) и заповедника «Столбы» (туристско-экскурсионная зона). Приведены индексы аккумуляции 62 элементов, рассчитанные как соотношение концентраций элементов в теле гриба к концентрациям элементов в верхнем слое почвы. Выявлены общие закономерности и особенности накопления шляпочными грибами некоторых элементов (F, Na, Cl, P, S, K, Cu, Zn, Br, Rb, Mo, Ag, Cd, Cs, Hg, лантаниды). Установлена возможность использования макромицетов в мониторинге загрязнения окружающей среды тяжелыми элементами и фтором.

**Ключевые слова:** макромицеты, элементный состав, фтор, индексы аккумуляции, почва, территория, заповедник, г. Красноярск.

*N.T. Otnyukova, A.M. Zhizhayev, N.P. Kutafyeva, A.T. Dutbayeva*

**MACROMYCETS AS THE ENVIRONMENTAL POLLUTION BIOINDICATORS IN KRASNOYARSK  
TERRITORY AND ITS VICINITIES**

The element composition of macromycets 16 types (pileate fungi and bracket fungi) in the territory of Krasnoyarsk (Akademgorodok) and the "Stolby" Reservation (the tourist-excursion zone) is studied. Indexes of 62 elements accumulation calculated as the correlation between the elements concentration in fungus body to elements concentration in the soil top layer are given. The general regularities and pileate fungi accumulation peculiarities of some elements (F, Na, Cl, P, S, K, Cu, Zn, Br, Rb, Mo, Ag, Cd, Cs, Hg, lanthanides) are revealed. The macromycets' usage possibility in monitoring of environmental pollution by heavy elements and fluorine is established.

**Key words:** macromycets, element composition, fluorine, accumulation indexes, soil, territory, Reservation, Krasnoyarsk.

**Введение.** Грибы являются неотъемлемым компонентом природных экосистем, они играют ключевую роль в поглощении и транслокации элементов в лесной подстилке и почве [1–3]. В лесных экосистемах основная схема аккумуляции и перераспределения элементов с участием макромицетов представлена в следующем виде: почва < ризосфера < грибной мицелий/ почвенно-корневая контактная зона (soil-root interface) < почвенно-корневая контактная зона (soil-root interface)/грибной мицелий < плодовое тело гриба [2]. Концентрации элементов изменяются (например, Rb) в следующем порядке: 3,9 (почва) < 5,4 (ризосфера) < 6,8 (почвенно-корневая зона) < 13,8 (грибной мицелий) < 253,9 мг/кг (плодовое тело) [2].

Аккумуляция макромицетами элементов в основном зависит от видовой принадлежности гриба [1–19], поэтому необходимым и обязательным условием при использовании макромицетов в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей является правильная видовая диагностика. Поскольку грибы также являются и пищевым ресурсом, то незнание видовой специфики может привести к катастрофическим для человека последствиям, так как даже в пределах одного рода виды различаются по способности аккумулировать токсические элементы. Так, например, из 8 исследованных видов рода *Agaricus* (шампиньон) [5] четыре вида накапливают Cd в количестве 1,0–4,99 мг/кг, три вида – в пределах 27,7–39,6 мг/кг, а один широко распространенный и съедобный вид *Agaricus macrocarpus* – более 100 мг/кг.

Большая часть литературных источников посвящена изучению элементного состава грибов как пищевого ресурса [5–7, 9–14, 16–18], гораздо меньше работ опубликовано по биоиндикационным [8, 15] и экосистемным [1–3] исследованиям; в отечественной литературе публикаций аналогичного содержания немного [4, 19–23].

**Цель исследований.** Изучить элементный состав различных видов макромицетов и верхнего горизонта почвы на территории г. Красноярск и его окрестностей; выявить общие закономерности и особенности накопления элементов шляпочными грибами; установить, какие тяжелые токсические элементы накоп-

ливаются в грибах в районе исследования; выявить возможность использования макромицетов в индикации загрязнения окружающей среды тяжелыми элементами и фтором.

**Объекты и методы исследований.** Исследования проводились в лесопарковой зоне города Красноярска (Академгородок) и на территории Государственного природного заповедника «Столбы», в туристско-экскурсионной зоне (ТЭР). Район исследования находится на расстоянии 20–22 км от Красноярского алюминиевого завода (КраЗ). Список изученных видов грибов представлен в таблице (табл. 1).

Таблица 1

**Список макромицетов, отобранных для элементного анализа на территории г. Красноярска (Академгородок) и заповедника «Столбы» (туристско-экскурсионный район, ТЭР)**

Академгородок			Заповедник «Столбы», ТЭР		
Латинское название	Русское название	Эколого-субстратная характеристика	Латинское название	Русское название	Эколого-субстратная характеристика
<i>Agaricus xanthodermus</i>	Шампиньон желтокожий	Гумусный сапротроф На почве с подстилкой Повсеместно	<i>Cantharellus cibarius</i>	Лисичка желтая	Микоризный На почве Спорадически
<i>Armillaria cepistipes</i>	Опенок серый	Ксилотроф На корнях пня с почвой Повсеместно	<i>Cortinarius</i> sp.	Паутинник	Микоризный На почве Спорадически
<i>Boletus aestivalis</i>	Белый гриб съедобный	Микоризный На почве Редко	<i>Leccinum scabrum</i>	Подберезовик обыкновенный	Микоризный На почве Спорадически
<i>Coprinus atramentarius</i>	Навозник серый	Ксилотроф Внутри пня с почвой Повсеместно	<i>Paxillus involutus</i>	Свинушка тонкая	Ксилотроф, сапротроф, микоризный На почве вдоль троп Повсеместно
<i>Morchella conica</i>	Сморчок конический	Сапротроф На почве Спорадически	<i>Russula delica</i>	Подгруздок белый	Микоризный (сосна) На почве Повсеместно
<i>Paxillus involutus</i>	Свинушка тонкая	Ксилотроф, сапротроф, микоризный На почве вдоль троп Повсеместно	<i>Russula foetens</i>	Валуй	Микоризный На почве Повсеместно
<i>Xerocomus subtomentosus</i>	Моховик зеленый	Микоризный На почве Редко	<i>Sparassis crispa</i>	Гриб-баран	Ксилотроф, паразит (хвойные) На корнях сосны с почвой Редко
Трутовые грибы ( <i>Merulius</i> sp., <i>Trametes</i> sp.)		Ксилотроф На березе Повсеместно	<i>Suillus grevillei</i>	Масленок лиственничный	Микоризный На почве Повсеместно

Для выявления элементного состава образцы весом до 0,2 г с добавлением  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$  (в соотношении 1:1) подвергались трехступенчатому автоклавному микроволновому вскрытию при 120–200°C. Полученные растворы анализировали на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Более подробно методика элементного анализа изложена в работе [24].

Выделения фтора из образцов и определение общего фтора проведено двумя методами: с помощью высокотемпературного озоления пробы с последующей дистилляцией (Институт биофизики, г. Красноярск) и путем сжигания пробы в кислородной колбе (Институте органической химии, г. Новосибирск).

Обработка полученных результатов проведена методом статистического анализа с использованием программы Excel Microsoft.

**Результаты исследований и их обсуждение. Общие закономерности накопления элементов в грибах.** Общая характеристика элементного состава макромицетов в районе исследования рассмотрена по восьми группам: биогенные (essential) макроэлементы, биогенные микроэлементы, макроэлементы, микроэлементы, тяжелые токсичные элементы, редкие и редкоземельные элементы, радионуклиды, галогены.

*Биогенные макроэлементы* (Ca, K, Mg, Na, P, S). Концентрации биогенных элементов, согласно настоящим (табл. 2) и ранее проведенным [24, 26] исследованиям, не выходят за пределы известного из литературных источников диапазона концентраций как для растений в целом [25], так и для макромицетов [1, 2, 5, 6, 8–11, 11–15, 18–23].

Интересной закономерностью аккумуляции макроэлементов шляпочными грибами является очень низкое накопление Ca в сравнении с растениями [24, 26], что полностью согласуется с литературными данными [1]. Как показывают настоящие результаты, кальций распределяется в различных частях гриба неравномерно: более высокие концентрации накапливаются в ножке, более низкие в шляпке (рис. 1). Так, например, в опенке содержание Ca в стерильной ножке выше в 3–4 раза (294 мг/кг), чем в плодовом теле (81,1–98,3 мг/кг). Наоборот, фосфор аккумулируется в большем количестве в плодовом теле (6419–6915 мг/кг) и в меньшем в ножке гриба (4904 мг/кг); между накоплением фосфора и кальция связь отрицательная ( $r = -0,97$ ,  $P < 0,05$ ).

Этот процесс описывается в литературе как биологически обусловленное исключение Ca из шляпки и преимущественное его накопление в ножке в связи с отрицательной зависимостью кальция и фосфора, жизненно необходимого для формирования спор [1].

*Макроэлементы* (Al, Fe, Si) и *биогенные микроэлементы* (Cu, I, Ni, Mn, Zn). Концентрации указанных элементов невысоки в сравнении с литературными данными [3–18, 25].

*Микроэлементы* (B, Ba, Li, Be, Co, Cs, Sr, Rb, Sc, Ti, V). Уровни накопления микроэлементов в районе исследования (см. табл. 2, а также [24, 26]) близки к нижним пределам концентраций, выявленным для шляпочных грибов [1–16].

Общей закономерностью микроэлементного состава шляпочных грибов является высокая аккумуляция Rb (см. табл. 2), концентрации которого, согласно литературным данным, могут составлять десятки-сотни и тысячи мг/кг [1, 2, 10]. Накопление Rb грибами обычно на порядок-два выше, чем в растениях в аналогичных условиях произрастания [1, 2, 10, 24]. Особенности аккумуляции цезия рассмотрены ниже.

*Тяжелые токсические элементы* (Ag, As, Au, Bi, Cd, Cr, Hg, Mo, Pb, Sb, Sn). Концентрации большинства тяжелых токсических элементов в районе исследования [24, 26, 27], за исключением Cd, Mo, Hg (см. табл. 2), находятся на нижнем пределе выявления как в растениях [26], так и в шляпочных грибах [4–23].

*Редкие и редкоземельные элементы* (Ce, Dy, Er, Eu, Ga, Ge, Gd, Hf, Ho, In, Ir, La, Lu, Nb, Nd, Os, Pd, Pr, Pt, Re, Rh, Ru, Sm, Ta, Tb, Te, Tl, Tm, W, Y, Yb, Zr). Уровни накопления редких элементов находятся на нижнем пределе амплитуд концентраций, выявленных для растений [25]. Особенности аккумуляции лантанидов рассмотрены ниже.

*Радионуклиды* (Th, U). Концентрации радионуклидов находятся на нижнем пределе амплитуд концентраций, выявленных в грибах [15].

*Галогены* (Br, Cl, F). Содержание брома (рис. 1) соответствует нижнему уровню накопления элемента в шляпочных грибах [17]. Особенности накопления хлора и фтора рассмотрены ниже.

Концентрации некоторых элементов в макромицетах и верхнем слое почвы на территории г. Красноярска (Академгородок) и заповедника «Столбы» (туристско-экскурсионный район, ТЭР)

Название	Вид	Cl	Mo	Ag	Cd	Cs	Hg
Академгородок	<i>A. xanthodermus</i> (n=5)	2293±423	0,504±0,077	11,5±2,16	0	0	0,571±0,338
	<i>A. cepistipes</i> (n=8)	455±76	0,125±0,027	0,355±0,087	2,27±0,608	0,056±0,007	0,018±0,007
	<i>B. aestivalis</i> (n=8)	1487±157	0,110±0,027	0	0	0	0
	<i>C. atramentarius</i> (n=4)	500±500	10,1±4,79	0,187±0,027	0,262±0,019	0,168±0,003	0
	<i>M. conica</i> (n=4)	2655±1414	0,341±0,156	0,035±0,014	0,102±0,038	0,063±0,017	0,024±0,009
	<i>P. involutus</i> (n=6)	855±251	0,261±0,156	1,22±0,320	0,082±0,032	0,106±0,031	0,199±0,117
	<i>X. subtomentosus</i> (n=2)	Нет данных	0,052±0,015	0,091±0,003	0,054±0,003	0,062±0,001	0,017±0,001
	Трутовые ( <i>Merulius</i> , <i>Trametes</i> ) (n=4)	0	0,144±0,018	0,060±0,013	0,264±0,033	0,026±0,003	0,020±0,008
	Верхний слой почвы (n=8)	303±184	0,568±0,117	0,553±0,167	0,069±0,019	0,395±0,103	0,110±0,110
Заповедник «Столбы», ТЭР	<i>C. cibarius</i> (n=2)	787±680	0,045±0,000	0,126±0,024	0,109±0,024	1,35±0,195	0,014±0,005
	<i>Cortinarius</i> sp. (n=2)	884±1,95	0,616±0,142	0,670±0,036	1,60±0,074	28,4±2,65	0,463±0,183
	<i>L. scabrum</i> (n=2)	0	0,073±0,024	0,024±0,005	0,055±0,008	0,020±0,001	0,01±0,004
	<i>P. involutus</i> (n=3)	401±318	2,06±1,27	0,664±0,074	0,012±0,012	0,097±0,012	0,130±0,119
	<i>R. delica</i> (n=4)	0	2,58±0,644	0,073±0,015	0,055±0,019	0,019±0,001	0,001±0,001
	<i>R. foetens</i> (n=4)	38±16	0,131±0,034	0,203±0,091	0	0	0,164±0,164
	<i>S. crispa</i> (n=2)	996±337	0,091±0,088	0,076±0,024	0,118±0,038	0,425±0,147	0,033±0,018
	<i>S. grevillei</i> (n=4)	393±73	3,28±0,364	0,254±0,075	0,225±0,162	0,419±0,161	0,012±0,010
	Верхний слой почвы (n=5)	Нет данных	0,284±0,031	0,106±0,027	0,096±0,040	0,504±0,141	0,286±0,087
Литературные данные [26]	Растения (амплитуда средних)	2500*	0,02–0,85(1,75**)	<0,001–0,66(16***)	0,01–16***	0,034–170	0,02–0,41
	Почвы (амплитуда средних)	265–920	0,7–4,1(5,8)	0,06–1,05	0,03–5(16)	1,0–850	0,0000

Примечание: n – количество проведенных анализов; \* максимальные концентрации, выше которых видны симптомы поражения растений; \*\* для семян бобовых растений; \*\*\* для некоторых видов растений.

**Особенности накопления некоторых элементов в грибах.** Рассмотрены особенности накопления следующих элементов и групп элементов: Cs, Cd, Mo, Ag, Hg, Cl, F, лантаниды.

**Цезий (Cs).** В районе исследования шляпочные грибы накапливают цезий в очень незначительных количествах, средние концентрации от 0,019 – 1,35 мг/кг, в некоторых видах цезий не обнаружен, максимальное содержание цезия (28,4 мг/кг), выявлено в паутиннике (*Cortinarius* sp.) (см. табл. 2). Полученные результаты согласуются с литературными данными, концентрации цезия в различных видах грибов составляют 0,089–12,7 мг/кг, единичные виды накапливают до 25,1 мг/кг [1, 2].

**Кадмий (Cd).** Концентрации Cd в различных видах грибов в районе исследования изменяются в широких пределах (от 0,019 до 4,36 мг/кг), даже отдельные плодовые тела одного вида накапливают различные уровни кадмия. Средние концентрации Cd в изученных видах грибов составляют в Академгородке 0,05–2,27 мг/кг, в заповеднике «Столбы» 0,01–1,60 мг/кг; наиболее высокие концентрации кадмия обнаружены в опенке и паутиннике (см. табл. 2).

Несмотря на то, что макромицеты хорошо аккумулируют кадмий, ни один из видов грибов не является гипераккумулятором, так как этот элемент является очень токсичным для макромицетов [3, 10], и, вероятно, поэтому концентрации Cd обычно не превышают 5 мг/кг [10], редко достигают 10 мг/кг [3].

Большое внимание в литературе уделяется нормам потребления Cd с продуктами питания, в частности, с грибами [16]. Согласно Всемирной организации здравоохранения, суточная доза потребления Cd не должна превышать 0,06 мг для человека весом 60 кг [16].

Одним из широко распространенных видов грибов, употребляемых в пищу, является опенок (*Armillaria*). Средние концентрации Cd в различных видах рода *Armillaria* обычно не превышают 1–2 мг/кг [10, 19]. В районе исследования содержание Cd в опенке сером составляет 2,27(0,20–4,36) мг/кг (см. табл. 2). Особо следует отметить, что кадмий в основном содержится в шляпке опенка, где средняя концентрация составляет 2,95 мг/кг, а в ножке в 10 раз меньше, в среднем 0,23 мг/кг (рис. 1).

**Молибден (Mo).** Концентрации молибдена в различных видах грибов в районе исследования изменяются в широких пределах, все виды изученных макромицетов накапливают Mo. Амплитуда концентраций в Академгородке изменяется от 0,004 до 23,3 мг/кг, в Заповеднике от 0,03 до 4,61 мг/кг, средние концентрации Mo в различных видах грибов составляют 0,052–10,1 мг/кг и 0,073–3,28 мг/кг соответственно (см. табл. 2).

Самое высокое содержание молибдена в районе исследования выявлено в навознике (*Coprinus*) (см. табл. 2), причем, концентрации Mo в шляпке гриба в два раза выше (5,73 мг/кг), чем в ножке (2,70 мг/кг) (см. рис. 1).

Сравнение города с заповедником, где концентрации молибдена в почве ниже, показывает, что съедобные виды грибов (*Russula delica* и *Suillus grevillei*) также способны накапливать Mo в высоких концентрациях, в среднем до 2,58 и 3,28 мг/кг соответственно (см. табл. 2). Выявленные концентрации Mo в грибах являются очень высокими (табл. 2) в сравнении с содержанием Mo в других группах растений на территории г. Красноярска и его окрестностей [24, 26], что свидетельствует о высоких индикаторных особенностях отдельных видов грибов.

Согласно литературным данным, на почвах с нормальным содержанием молибдена уровни накопления этого элемента растениями в природных условиях обычно редко превышает 0,2 мг/кг, и только на нейтральных и щелочных, богатых молибденом почвах растения могут накапливать Mo до 50 мг/кг [27]. Среднее содержание Mo в макромицетах составляет <0,05–0,083 мг/кг, а концентрации, достигающие 0,14 мг/кг, считаются аномально высокими для шляпочных грибов [28].

В пищевых растениях концентрации Mo допустимы в пределах 0,07–0,85(1,75) мг/кг (максимум относится к семенам бобовых) [25], в районе исследования содержание Mo в некоторых съедобных грибах выше в несколько раз.

**Серебро (Ag).** Концентрации Ag в различных видах грибов изменяются в Академгородке от 0 до 16,9 мг/кг, в заповеднике «Столбы» от 0,019 до 0,792 мг/кг. Две трети видов (до 85%) накапливают Ag в среднем количестве 0,02–0,67 (1,22) мг/кг, самые высокие концентрации Ag (11,5 мг/кг) выявлены в шампиньоне (*Agaricus xanthodermus*) (см. табл. 2).

Полученные результаты согласуются с литературными данными, которые показывают, что обычный уровень накопления Ag макромицетами очень низок (0,001–0,90 мг/кг) [6, 16], однако в некоторые виды грибов концентрации Ag могут достигать 2,9–6,9 мг/кг [6, 16]. Так, в работе [17] показано, что средние концентрации Ag в 32 видах макромицетов (90% от изученных видов) обычно составляют 0,03–0,68 мг/кг, и только три вида из двух родов накапливают высокие концентрации серебра: *Agaricus* (6,63–6,97 мг/кг) и *Amanita* (4,69 мг/кг).

В районе исследования сибирская популяция вида *Agaricus xanthodermus* накапливает почти в два раза более высокие концентрации Ag (см. табл. 2), чем обычные виды, такие как *A. campestris* и *A. bitorguis* [16]. По-

лученные результаты показывают преимущественное накопление Ag в шляпке шампиньона – 13,5 мг/кг в сравнении с ножкой – 3,75 мг/кг (см. рис. 1).

**Лантаниды.** Концентрации редкоземельных элементов в растениях [25] и макромицетах обычно очень низки [28]. Суммарные концентрации лантанидов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Ga, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в различных видах грибов в Академгородке изменяются от 0,078 до 1,44 мг/кг, что выше, чем в заповеднике – от 0,082 до 0,83 мг/кг. Основная масса (до 80%) приходится на четыре первых элемента (La, Ce, Pr, Nd), доминирует церий. В почве, где суммарные концентрации на порядок выше и составляют в среднем 16,2 мг/кг (Академгородок) и 9,2 мг/кг (заповедник, ТЭР), наблюдается аналогичное распределение лантанидов (см. табл. 2).

Полученные результаты согласуются с литературными данными, которые показывают, что среди массива проанализированных видов грибов большая часть обычно содержит низкие и относительно невысокие концентрации суммарных лантанидов (0,05–1,67 мг/кг) и только треть видов накапливает значительное количество этих редкоземельных элементов (3–62 мг/кг) [28].

Коэффициент корреляции показывает, что лантаниды взаимодействуют группой и аккумулируются в грибах вместе (табл. 3). Полученные результаты также согласуются с литературными данными [30], которые показывают, что соотношение между элементами практически постоянно, Ce доминирует до 50%, вместе с La и Nd концентрации трех элементов достигают 80% [28, 29].

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции между элементами в шляпочных грибах на территории г. Красноярск (Академгородок) \***

Элемент	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
Ce	0,95											
Pr	0,90	0,90										
Nd	0,94	0,96	0,90									
Sm		0,90	0,92	0,92								
Eu		0,63	0,77	0,70	0,84							
Gd	0,77	0,80	0,83	0,88	0,86	0,84						
Tb			0,70		0,75	0,95	0,78					
Dy	0,73	0,79	0,78	0,84	0,92	0,89	0,86	0,80				
Ho			0,67		0,72	0,86	0,79	0,93	0,77			
Er	0,68	0,70	0,82	0,77	0,84	0,95	0,91	0,90	0,88	0,82		
Tm						0,83		0,93	0,66	0,87	0,74	
Yb	0,63	0,70	0,72	0,75	0,75	0,76	0,87	0,70	0,75	0,63	0,83	
Lu					0,63	0,81	0,74	0,91		0,96	0,80	0,87

Примечание. \*  $P < 0,0001$ .

**Ртуть (Hg).** Концентрации ртути в шляпочных грибах изменяются в пределах от 0 до 1,83 мг/кг; средние концентрации Hg составляют в Академгородке 0,016–0,57 мг/кг, в заповеднике «Столбы» 0,001–0,46 мг/кг (см. табл. 2), что ниже среднего уровня накопления ртути макромицетами в Европе (0,02–4,4 мг/кг) [9].

В районе исследования содержание Hg в съедобных шляпочных грибах низко, однако в некоторых видах грибов (в основном, несъедобные) превышает допустимые уровни концентраций для растительных организмов (см. табл. 2).

**Хлор (Cl).** Средние концентрации хлора в шляпочных грибах в заповеднике ниже (0–996 мг/кг), чем в городе (455–2655 мг/кг), а в почве еще ниже (303 мг/кг) в сравнении с грибами (см. табл. 2). Накопление хлора в районе исследования находится на нижнем пределе концентраций, выявленных для грибов (2380–32000 мг/кг) [10, 18] и почвы (265–920 мг/кг) [25].

**Фтор (F).** Концентрации F в изученных видах грибов очень высоки и составляют в среднем 80(74–80) мг/кг (Академгородок) и 32,8(14,3–57,6) мг/кг (Заповедник). Изученные виды грибов накапливают следующие концентрации фтора в Академгородке: опенок – 86 мг/кг, подберезовик – 80 мг/кг, свинушка – 74 мг/кг; на территории заповедника: подгруздок сухой – 57 мг/кг, свинушка – 20 мг/кг.

Фтор не является необходимым элементом для жизнедеятельности, роста и развития растительных организмов [25]. Природное содержание фтора в почве достигает порядка 200–1000 мг/кг [25], однако только

десятичные доли процента доступны растениям, так как в почве в составе частиц минеральных соединений фтор плохо растворим [25].

Тем не менее, многие растения аккумулируют фтор из почвы (например, разновидности чая – *Thea*, *Camellia*) в очень большом количестве, до 1000 мг/кг и более [30, 31]; те виды растений, которые накапливают фтор из воздуха, являются индикаторами атмосферного загрязнения фтором [30].

Практически нет никаких данных в доступной научной литературе относительно накопления F макромицетами. Исключение составляет одна публикация из Японии, авторы которой изучали применение метода PIXE для элементного анализа растительных образцов, в том числе, и фтора в макромицетах, выявленного в пределах 29,1–74,2 мг/кг [17], что сопоставимо с настоящими результатами (14,3–86 мг/кг).

Концентрации фтора в различных видах грибов районе исследования превышают в 10–60 раз тот нижний предел, который допустим для пищевых растений, равный 1,5 мг/кг [32].

**Индекс аккумуляции элементов макромицетами.** Индекс аккумуляции представляет собой отношение концентрации элемента в теле гриба к концентрации этого же элемента в верхнем слое почвы. Индексы рассчитаны для всех видов макромицетов в целом (табл. 4) и для каждого из изученных видов (табл. 5). Индексы выше единицы показывают, во сколько раз концентрации элементов в видах-аккумуляторах превышают концентрации элементов в верхнем слое почвы.

Таблица 4

**Индексы аккумуляции элементов макромицетами на территории г. Красноярска (Академгородок) и заповедника «Столбы» (туристско-экскурсионный район, ТЭР)**

Индекс аккумуляции	Академгородок	Заповедник «Столбы», ТЭР
<0,01–0,09	<b>Li, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ga, Ge, Sr, Y, Zr, Nb, In, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Tl, Pb, Bi, Th, U</b>	<b>Li, Be, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ga, Ge, Sr, Y, Zr, Nb, In, Sn, Sb, I, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Pb, Bi, Th, U</b>
0,10–0,99	<b>Be, B, Na, Mg, Cr, Ni, As, Sn, Sb, I, Cs, W, Hg</b>	<b>B, Mg, Cu, Zn, As, Br, Hg, Tl</b>
1,0 и более	<b>P, S, K, Cu, Zn, Br, Rb, Mo, Ag, Cd</b>	<b>Na, P, S, K, Rb, Mo, Ag, Cd, Cs</b>

*Примечание. Жирным шрифтом выделены элементы с индексом аккумуляции одного порядка (индекс – отношение средних концентраций элементов в макромицетах к средней концентрации элементов в верхнем слое почвы).*

**Индексы аккумуляции <0,01–0,09.** Из общего числа (62) выявленных элементов большую их часть, 38–44 элемента, грибы аккумулируют очень слабо (см. табл. 4). С одной стороны, это элементы редкие и редкоземельные; с другой, массовые элементы минеральных частиц почвы (Al, Si, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Sr, Ba), которые слабо растворимы в воде и поэтому мало доступны для биоаккумуляции. Интересно отметить, что в районе исследования в целом очень низок индекс аккумуляции грибами Pb (см. табл. 4), который считается одним из основных загрязнителей антропогенного происхождения [25], что может свидетельствовать о несущественном загрязнении района исследования свинцом.

**Индексы аккумуляции 0,10–0,99.** Число элементов с такими индексами в Академгородке 13, в Заповеднике 8, общих элементов для обоих регионов 4 (B, Mg, As, Hg) (см. табл. 4). Из них B, Mg – биогенные элементы, As, Hg – токсичные для живых организмов элементы. Известно, что шляпочные грибы являются хорошими индикаторами загрязнения почвы ртутью и мышьяком [4, 19]. Интересно отметить, что в районе исследования ни один из изученных видов грибов не аккумулирует мышьяк в количестве, превышающем нижний предел в растениях [25], что может свидетельствовать о незначительном загрязнении почв мышьяком в районе исследования.

Кроме того, как было показано многими исследователями [1–18], видовая специфика играет существенную роль в биоиндикационных исследованиях. Рассмотрим этот тезис на примере накопления грибами ртути (см. табл. 4, 5). Так, общий (для 16 видов грибов) индекс аккумуляции в среднем меньше единицы (см. табл. 4), в то время как индекс отдельных индикаторных видов может быть выше единицы (см. табл. 5).

Индексы аккумуляции > 1,0. Высокие индексы аккумуляции (см. табл. 4, 5) показывают, что грибы интенсивно аккумулируют элементы из почвы. Общими для обоих регионов с высокими индексами аккумуляции являются 7 элементов (**P, S, K, Rb, Mo, Ag, Cd**) (см. табл. 4).

Как показывают литературные данные, все виды грибов накапливают в значительном количестве биогенные элементы (P, S, K) [10], а также Rb, который является постоянным компонентом почвы и всегда аккумулируется грибами в значительном количестве [1, 2].

Свидетельством особенности загрязнения района исследования является высокое накопление в грибах Mo, Ag и Cd. Литература, касающаяся аккумуляции этих элементов макромицетами, немногочисленна [6, 16, 27, 28]. В небольшом количестве Mo и Ag являются необходимыми микроэлементами, однако высокие концентрации токсичны [25]. Кадмий не является жизненно необходимым элементом для роста и развития шляпочных грибов, поэтому токсичен [10].

Помимо вышеуказанных элементов, в Академгородке высок индекс аккумуляции шляпочными грибами Cu, Zn, Br, а в Заповеднике Na, Cs (см. табл. 4) за счет отдельных индикаторных видов (см. табл. 5).

Таблица 5

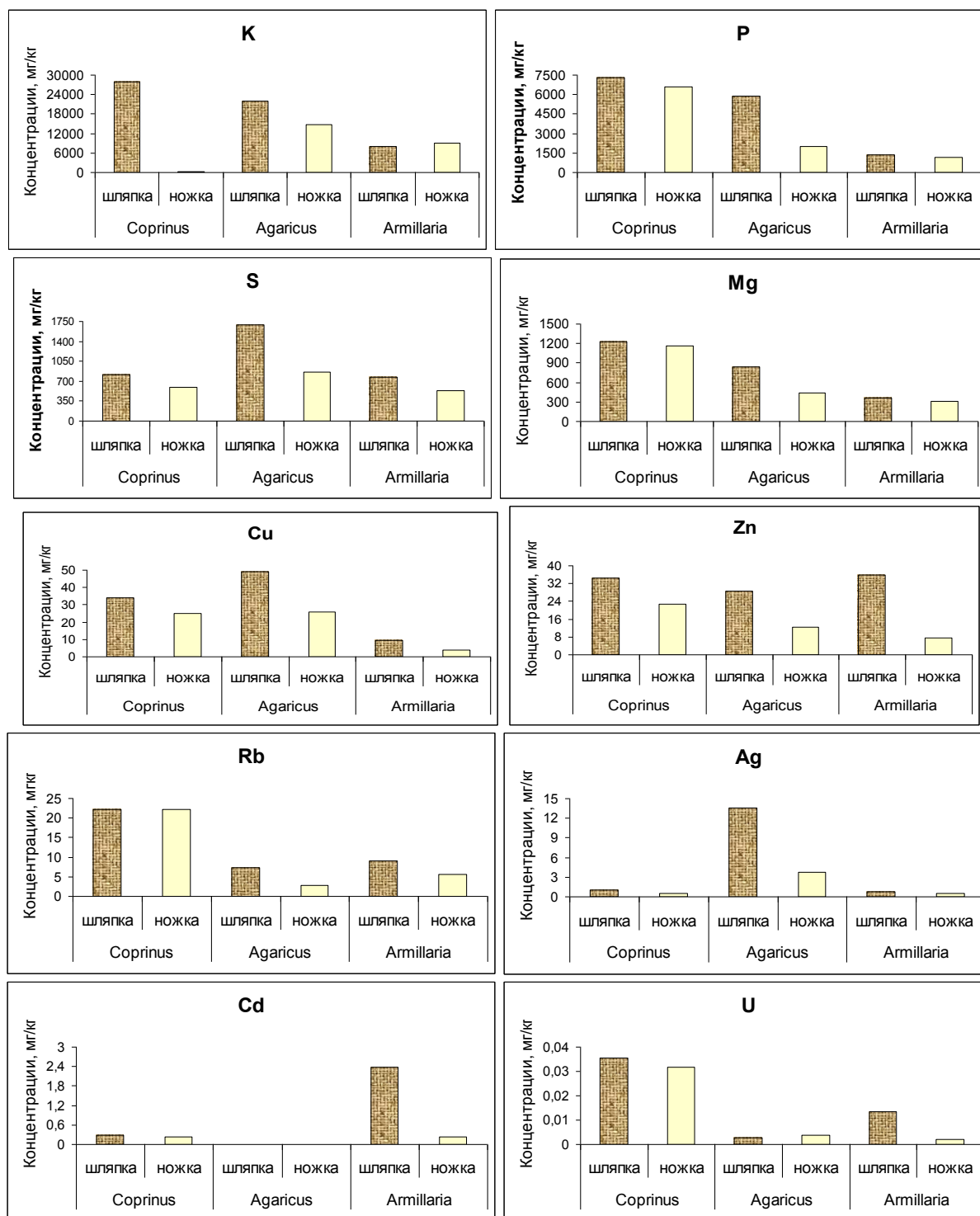
**Индексы аккумуляции некоторых элементов различными видами макромицетов на территории г. Красноярска (Академгородок) и заповедника «Столбы» (туристско-экскурсионный район, ТЭР)**

Район	Вид	Na	P	S	K	Cu	Zn	Br	Rb	Mo	Ag	Cd	Cs	Hg
Академгородок	<i>Agaricus xanthodermus</i>	**	<b>6,5</b>	3,4	4,4	4,4	1,1	1,2	**	**	<b>21</b>	0	*	<b>5,1</b>
	<i>Armillaria cepistipes</i>	1,9	1,8	1,6	1,7	**	1,2	**	**	**	**	<b>26</b>	*	**
	<i>Boletus aestivalis</i>	**	1,8	<b>9,1</b>	1,5	**	**	**	<b>7,8</b>	**	0	0	0	0
	<i>Coprinus atramentarius</i>	1,7	<b>10</b>	1,7	4,4	3,0	1,3	2,2	2,1	<b>17</b>	**	3,7	**	0
	<i>Morchella conica</i>	**	<b>6,8</b>	2,9	2,2	**	1,6	**	**	**	*	1,5	**	**
	<i>Paxillus involutus</i>	**	4,3	2,1	4,0	2,5	1,4	**	**	**	2,2	1,1	**	1,8
	<i>Xerocomus subtomentosus</i>	**	3,5	4,6	3,5	**	**	**	3,2	*	**	**	**	**
	Трутовые ( <i>Merulius, Trametes</i> )	**	3,5	1,8	**	**	1,5	**	2,6	**	*	3,7	*	**
Заповедник «Столбы», ТЭР	<i>Cantharellus cibarius</i>	2,1	2,5	**	**	2,8	1,1	**	<b>9,1</b>	**	1,1	1,1	2,8	*
	<i>Cortinarius sp.</i>	4,9	<b>5,7</b>	2,8	4,1	4,8	1,7	1,8	<b>40</b>	2,6	<b>6,7</b>	<b>16</b>	<b>56</b>	1,6
	<i>Leccinum scabrum</i>	**	**	**	**	**	**	*	*	**	**	**	*	*
	<i>Paxillus involutus</i>	1,5	<b>5,7</b>	1,6	4,2	3,6	1,2	1,2	1,3	<b>7,1</b>	<b>6,6</b>	**	**	**
	<i>Russula delica</i>	**	2,0	**	2,0	1,8	**	**	**	<b>9,0</b>	**	**	*	*
	<i>Russula foetens</i>	**	3,8	3,3	2,6	2,2	**	**	4,8	**	2,0	0	0	**
	<i>Sparassis crispa</i>	**	2,3	2,8	1,2	**	**	**	1,1	**	**	1,1	**	*
	<i>Suillus grevillei</i>	**	2,8	**	2,6	**	**	2,1	4,9	<b>11</b>	2,9	2,8	**	*

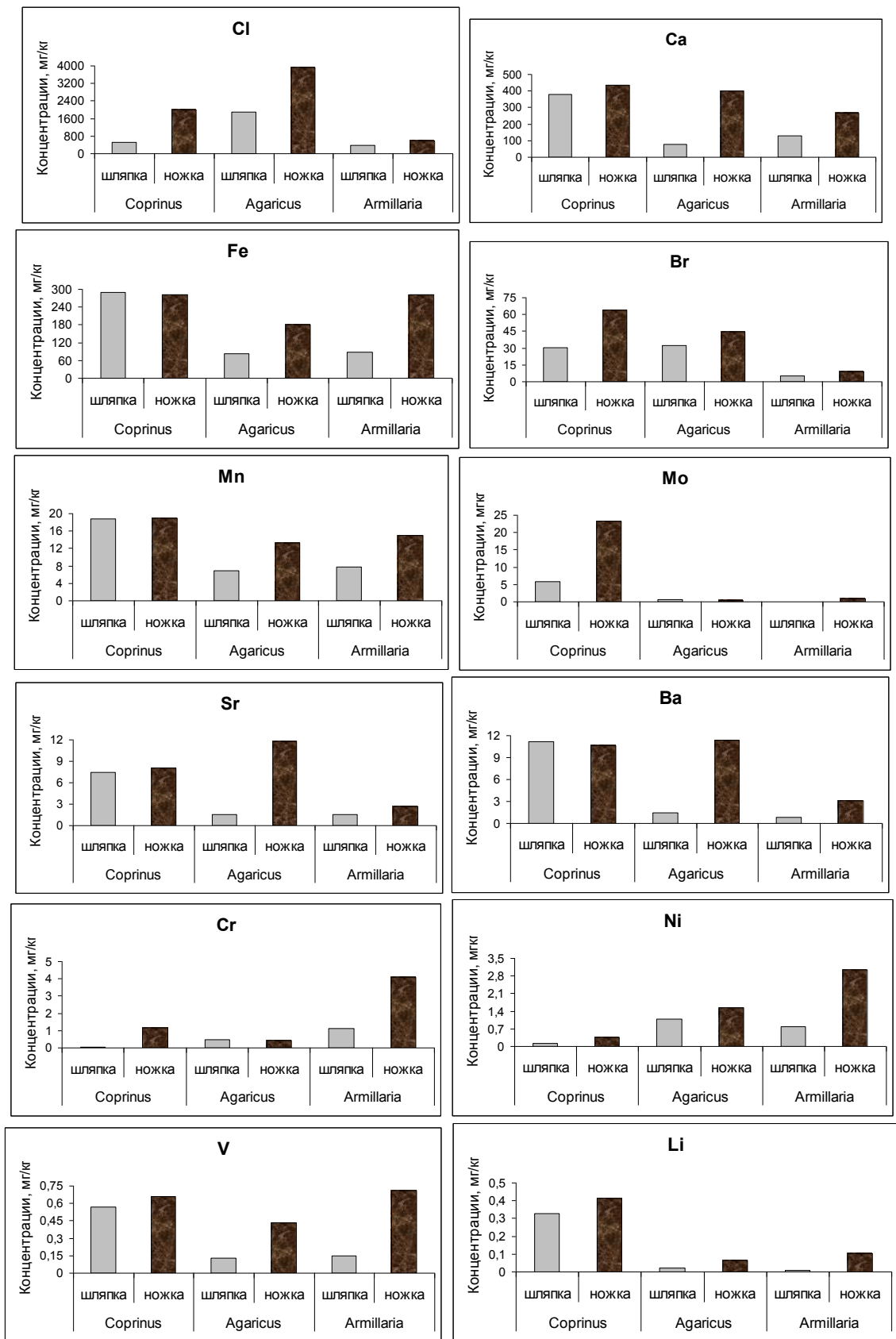
Примечание. Индекс аккумуляции (отношение средних концентраций элементов в каждом виде макромицета к средней концентрации элементов в верхнем слое почвы): \* 0,01–0,1; \*\* – 0,11–1,0. Ноль (0) – элемент в данном виде не обнаружен. Жирный шрифт – индексы аккумуляции от 5 до 10; жирный шрифт с подчеркиванием – индексы аккумуляции выше 10.



Таким образом, высокие индексы аккумуляции элементов макромицетами свидетельствуют об особенностях загрязнения района исследования в целом Mo, Ag и Cd (см. табл. 4), а также о специфике накопления этих и других элементов (Na, Cu, Zn, Br, Cs) различными видами шляпочных грибов (см. табл. 5).



Концентрации элементов в шляпке и ножке различных видов грибов в березовой роще в Академгородке (г. Красноярск): с превышением концентраций в шляпке макромицетов. Условные обозначения: *Coprinus* – *Coprinus atramentarius* (навозник серый), *Agaricus* – *Agaricus xathodermus* (шампиньон желтокожий), *Armillaria* – *Armillaria cepistipes* (опенок серый)



Окончание рис. Концентрации элементов в шляпке и ножке различных видов грибов в березовой роще в Академгородке (г. Красноярск): с превышением концентраций в ножке

**Индикаторные виды и биоиндикация.** Грибы в целом являются индикаторами загрязнения почвы и субстрата, на котором произрастают, хотя не исключено частичное накопление загрязнителей из атмосферы, несмотря на короткий срок существования (дни) плодового тела гриба. В индикационных и мониторинговых исследованиях большое значение имеет способность макромицетов накапливать тяжелые элементы. В районе исследования индикаторами являются *Agaricus* (шампиньон), *Armillaria* (опенок), *Coprinus* (навозник), *Cortinarius* (паутинник), *Paxillus* (свинушка). Шампиньон в значительном количестве аккумулирует Ag и Hg, опенок – Cd, навозник – Mo и Cd, паутинник – Rb, Ag, Cd, Cs, Hg, свинушка – Mo и Ag. Трубочатые грибы (*Boletus*, *Leccinum*, *Xerocomus*) в меньшей степени накапливают Mo, Ag, Cd (за исключением *Suillus*), чем пластинчатые (*Agaricus*, *Armillaria*, *Coprinus*, *Cortinarius*, *Russula*). Все изученные виды шляпочных грибов (*Armillaria*, *Leccinum*, *Paxillus*, *Russula*) аккумулируют в значительном количестве фтор. Шляпочные грибы избирательно накапливают некоторые элементы в различных частях плодового тела: либо в стерильной ножке, либо в шляпке (рис.). Интересно отметить, что биогенные макро- и микроэлементы (K, P, S, Mg, Zn, Cu) в основном аккумулируются в шляпке, чем и объясняется пищевая ценность грибов. Однако такие тяжелые элементы, как Ag и Cd также накапливаются в шляпке, что приводит к их токсичности. Следует обратить внимание, что такой популярный съедобный гриб как опенок накапливает тяжелые металлы (Cd) и радионуклиды (U) именно в шляпке.

Основная масса элементов (Ba, Br, Ca, Cl, Cr, Fe, Li, Mn, Ni, Mo, Sr, V) аккумулируется в ножке гриба. Известно, что причиной исключения кальция из шляпки является антагонизм между Ca и P, и, возможно, перераспределение и средоточие элементов в ножке гриба также объясняются биологическими особенностями макромицетов.

Биоиндикация и биомониторинг состояния окружающей среды с помощью различных видов макромицетов может быть эффективным инструментом слежения за состоянием окружающей среды.

### Заключение

В целом уровни накопления элементов в грибах в районе исследования находятся на нижнем пределе диапазона концентраций, выявленных для растений и грибов, что свидетельствует о низком геохимическом фоне. Исключение составляет загрязнение территории тяжелыми токсическими элементами (Ag, Cd, Hg, Mo) и фтором.

Из 16 изученных видов Cd накапливают трутовые грибы и 8 видов шляпочных грибов, Ag – 6, Mo – 5, Hg – 2 вида шляпочных грибов. Наивысшие индексы аккумуляции элементов грибами составляют: кадмия – 1,1–26,0, серебра – 1,1–21,0, молибдена – 2,6–17,0, ртути – 1,6–5,1.

Шампиньон (*Agaricus xanthodermus*) в значительном количестве аккумулирует Ag и Hg, опенок (*Armillaria cepistipes*) – Cd, навозник (*Coprinus atramentarius*) – Mo и Cd, паутинник (*Cortinarius* sp.) – Rb, Ag, Cd, Cs, Hg, свинушка (*Paxillus involutus*) – Mo и Ag. Фтор аккумулируют все изученные виды грибов – опенок (*Armillaria cepistipes*), подберезовик (*Leccinum scabrum*), сухой груздь (*Russula delica*), свинушка (*Paxillus involutus*).

Представленные результаты являются предварительными, которые, тем не менее, показывают перспективность дальнейшего исследования макромицетов в качестве индикаторов загрязнения окружающей среды.

### Литература

1. Uptake of elements by fungi in the Forsmark area / K.J. Johanson [et al.]. – TR-04-06. – Stockholm, 2006. – 86 p.
2. Vinichuk, M. Accumulation of potassium, rubidium and caesium 135Cs and 137Cs in various fractions of soil and fungi in a Swedish forest / M. Vinichuk [et al.] // Science of the total Environment. – 2010. – V. 408. – P. 2543–2548.
3. Chudzyński K., Falandysz J. Multivariate analysis of elements content of Larch Bolete (*Suillus grevillei*) mushroom // Chemosphere. – 2008. – V. 73. – P. 1230–1239.
4. Иванов А.И., Костычев А.А., Скобанев А.В. Аккумуляция тяжелых металлов и мышьяка базидиомами макромицетов различных эколого-трофических и таксономических групп // Поволжский экол. журн. – 2008. – № 3. – С. 190–199.
5. Cocchi L., Petrini L.E., Petrini O. Heavy metals in edible mushrooms in Italy // Food Chemistry. – 2006. – V. 98. – P. 277–284.

6. Konuk M., Afyon F., Yağiz D. Minor element and heavy metal contents of wild growing and edible mushrooms from western Black sea region of Turkey // Fresenius Environmental Bulletin. – 2007. – V. 16. – № 11. – P. 1359–1362.
7. Vetter J. Inorganic iodine content of common, edible mushrooms // Acta Alimentaria. – 2010. – V. 39. – № 4. – P. 424–430.
8. Cuny D., C. van Haluwyn, Pesch R. Biomonitoring trace elements in air and soil compartments along the major motorway of France // Water, Air and Soil Pollution. – 2001. – V. 125. – P. 273–289.
9. Kalač P., Svoboda L., Havličková B. Content of detrimental metals mercury, cadmium and lead in wild growing edible mushrooms: a review // Energy Education Science and Technology. – 2004. – V. 13(1). – P. 31–38.
10. Kalač P. Trace element contents in European species of wild growing edible mushrooms: A review for the period 2000–2009 // Food Chemistry. – 2010. – V. 122. – P. 2–19.
11. Sesli E., Tuzen M., Soyлак M. Evaluation of trace metal contents of some wild edible mushrooms from Black Sea region, Turkey // Journal of Hazardous Materials. – 2008. – V. 160. – P. 462–467.
12. Chemical composition of four wild edible mushroom species collected from southwest Anatolia / F. Kalyoncu [et al.] // Gazi University Journal of Science. – 2010. – V. 23(4). – P. 375–379.
13. Colak A., Faiz Ö., Sesli E. Nutritional composition of some wild edible mushrooms // Turkish Journal of Biochemistry. – 2009. – V. 34(1). – P. 25–31.
14. Zeković, Z., Vidović S., Mujić I. Selenium and Zinc content and radical scavenging capacity of edible mushrooms *Armillaria mellea* and *Lycoperdon saccatum* // Croat. J. Food Sci. Technol. – 2010. – V. 2(2). – P. 16–23.
15. Campos J.A., N.A. Tejera. Substrate role in the accumulation of heavy metals in sporocarps of wild fungi // Biometals. – 2009. – V. 22. – P. 835–841.
16. Content of metals in some wild mushrooms; its impact in human health / H.H. Doğan [et al.] // Biological Trace Element Research. – 2006. – V. 110. – P. 79–94.
17. Fluorine and multi-element analysis of mushroom samples by means of PIXE system / J. Itoh [et al.] // International Journal of PIXE. – 2005. – V. 15. – P. 285–291.
18. Nutritional value and metal content of wild edible mushrooms collected from West Macedonia and Epirus, Greece / P.K. Ouzouni [et al.] // Food Chemistry. – 2009. – V. 115. – P. 1575–1580.
19. Костычев А.А. Возможность использования базидиальных макромицетов в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. – 2009. – № 1. – С. 108–112.
20. Поддубный А.В., Христофорова Н.К. Оценка качества среды по содержанию тяжелых металлов в опенке осеннем *Armillaria mellea* // Микология и фитопатология. – 1999. – Т. 33. – Вып. 4. – С. 271–275.
21. Микоиндикация загрязнения лесных экосистем тяжелыми металлами / Б.П. Чураков [и др.] // Микология и фитопатология. – 2000. – Т. 34. – Вып. 2. – С. 57–61.
22. Тяжелые металлы в представителях различных групп грибов / Б.П. Чураков [и др.] // Микология и фитопатология. – 2004. – Т. 38. – Вып. 2. – С. 68–77.
23. Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Грибы-биоиндикаторы техногенного загрязнения // Природа. – 2002. – № 11. – С. 7–11.
24. Отнюкова Т.Н., Жижаев А.М., Кутафьева Н.П. Элементный состав биоиндикаторов фтмосферного загрязнения на территории г. Красноярска // Вестн. КрасГАУ. – 2012. – № 2. – С. 123–126.
25. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in Soils and plants. – Boca-Raton, London, New-York, Washington, D.C.: CRC Press, 2001. – 403 p.
26. Элементный состав некоторых видов растений и грибов на территории заповедника «Столбы» / Т.Н. Отнюкова [и др.] // Научные исследования в заповедниках и национальных парках Южной Сибири. – 2011. – Вып. 1. – С. 30–36.
27. Doyle P., Fletcher W.K., Brink V.C. Trace element content of soils and plants from the Selwyn Mountains, Yukon and northwest territories // Canadian Journal of Botany. – 1973. – 51(2). – P. 421–427.
28. Simultaneous uptake of rare earth elements, aluminium, iron, and calcium by various macromycetes / T. Stijve [et al.] // Australian Mycologist. – 2001. – 20(2). – P. 92–98.
29. Aruguete D.M., Altstadt J.H., Mueller G.M. Accumulation of several heavy metals and lanthanides in mushrooms (Agaricales) from the Chicago region // The Science of the Total Environment. – 1998. – 224. – P. 43–56.

30. Weinstein L.H., Davison A.W. Native plant species suitable as bioindicators and biomonitors for airborne fluoride // Environmental Pollution. – 2003. – V. 125. – P. 3–11.
31. Weinstein L.H., Davison A.W. Fluorides in the Environment. – Newcastle: CABI Publishing, 2004. – 287 p.
32. Методические указания по ионометрическому определению содержания фтора в растительной продукции, кормах и комбикормах. – М.: Минсельхоз, 1995.



УДК 581.522.4

Р.А. Сейдафаров

#### ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ПИГМЕНТОВ АССИМИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА ЛИПЫ МЕЛКОЛИСТНОЙ (*TILIA CORDATA* MILL.)

*Изучено влияние нефтехимического и полиметаллического загрязнения на пигментный фонд липы мелколистной. Показано, что различные типы загрязнения по-разному влияют на концентрацию хлорофилла. Проанализирована защитная роль каротиноидов в условиях загрязнения.*

**Ключевые слова:** техногенез, нефтехимическое загрязнение, полиметаллическое загрязнение, липа мелколистная, хлорофилл, каротиноиды, ассимиляционный аппарат.

R.A. Seydafarov

#### ANTHROPOGENIC POLLUTION INFLUENCE ON THE PIGMENT CONCENTRATION IN *TILIA CORDATA* (TILIA CORDATA MILL.) ASSIMILATION APPARATUS

*The influence of petrochemical and polymetallic pollution on Tilia Cordata pigment stock is studied. It is shown that different types of pollution influence on chlorophyll concentration in different ways. The carotenoid protective function in pollution conditions is analyzed.*

**Keywords:** anthropogenesis, petrochemical pollution, polymetallic pollution, carotenoids, assimilation apparatus.

---

**Введение.** Фотосинтез – очень чувствительный физиологический процесс, зависящий от состояния ассимиляционного аппарата и растения в целом.

Хлорофилл – основной фотосинтетический пигмент растения. Хлорофилл имеет несколько модификаций, из которых хлорофиллу *a* принадлежит ведущая роль в функционировании фотосинтетических систем листа. Каротиноидам принадлежит важная роль в защите зеленых пигментов листа от фотоокисления [1–4].

Согласно литературным данным, липа мелколистная характеризуется следующими особенностями влияния промышленного загрязнения на пигментный фонд. На содержание пигментов хлорофильного комплекса наибольшее влияние в середине вегетационного периода оказывает загрязнение атмосферы ароматическими аэрозолями. В конце вегетационного периода максимальное снижение содержания хлорофилла *a* и хлорофилла *b* происходит в условиях смешанного (органического и неорганического) загрязнения. Относительно каротиноидов имеются сведения, что в ходе всего вегетационного периода они наиболее чувствительны к смешанному типу загрязнения [5, 6].

Имеются данные о значительно большем (на 41,8 %) по сравнению с другими листовыми породами [7, 8] снижении содержания пигментов, преимущественно хлорофилла *a*, под влиянием загрязнения.

**Целью исследования** было изучения влияния техногенного загрязнения на концентрацию пигментов в листьях липы мелколистной.

**Методика исследования.** Район исследования был разделен на две зоны – сильного и слабого загрязнения (рис. 1). В каждой зоне были заложены пробные площади в древостоях липы мелколистной, охватывающие как водораздельное плато, так и пойму. Исследования проводились на модельных деревьях.