

№ 1670

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНСТИТУТ СТАЛИ и СПЛАВОВ
Технологический университет



Т.В. Черненкова, А.М. Степанов

ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ. ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Раздел: *Воздействие тяжелых металлов на растения*

Курс лекций

МОСКВА 2001

№1670

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ИНСТИТУТ СТАЛИ и СПЛАВОВ
Технологический университет

МИСиС



Кафедра теплофизики и экологии
металлургического производства

Т.В. Черненкова, А.М. Степанов

ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ. ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Раздел: *Воздействие тяжелых металлов на растения*

Курс лекций

для студентов специальностей 3301, 3302

Рекомендовано редакционно-издательским
советом института в качестве учебного пособия

МОСКВА 2001

УДК 504.7.05

Ч49

Ч49 *Черненкова Т.В., Степанов А.М.* Общая экология. Природопользование: Воздействие тяжелых металлов на растения. Курс лекций. – М.: МИСиС, 2001. – 139 с.

Курс лекций содержит полный обзор особенностей накопления тяжелых металлов представителями всех систематических групп растений – грибов, водорослей, лишайников, мохообразных и сосудистых; сведения о реакции их на избыточные дозы токсикантов, об использовании различных систематических групп и их отдельных представителей в биомониторинге загрязнения окружающей среды. Приведена информация о естественных и антропогенных источниках содержания металлов в биосфере и даны конкретные примеры исследования оценки трансформации лесных сообществ в окрестностях металлургических комбинатов.

Пособие предназначено для студентов специальностей 3301, 3302.

© Московский государственный
институт стали и сплавов
(Технологический университет)
(МИСиС), 2001

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ГРИБЫ	7
1.1. Морфо-физиологические особенности грибов	7
1.2. Особенности аккумуляции тяжелых металлов грибами	8
1.3. Реакция грибов на действие загрязняющих веществ	12
1.4. Использование грибов в биомониторинге	15
2. ВОДОРОСЛИ.....	17
2.1. Морфо-физиологические особенности.....	17
2.2. Особенности аккумуляции тяжелых металлов водорослями	18
2.3. Реакция водорослей на действие загрязняющих веществ	19
2.4. Использование водорослей в биомониторинге	29
3. ЛИШАЙНИКИ.....	31
3.1. Морфо-физиологические особенности лишайников	31
3.2. Особенности аккумуляции тяжелых металлов лишайниками	32
3.3. Реакция лишайников на действие загрязняющих веществ	35
3.4. Использование лишайников в биомониторинге	37
4. МОХООБРАЗНЫЕ	43
4.1. Морфо-физиологические особенности мохообразных.....	43
4.2. Особенности аккумуляции тяжелых металлов мохообразными ...	44
4.3. Реакция мхов на действие загрязняющих веществ.....	51
4.4. Использование мхов в биомониторинге	55
5. СОСУДИСТЫЕ РАСТЕНИЯ.....	60
5.1. Морфо-физиологические особенности.....	60
5.2. Особенности аккумуляции тяжелых металлов сосудистыми растениями.....	61
5.3. Реакция сосудистых растений на действие загрязняющих веществ	87
5.4. Использование сосудистых растений в биомониторинге	108
ЛИТЕРАТУРА	110
СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ	135

ВВЕДЕНИЕ

При анализе изменения биологических объектов в результате техногенного воздействия использования лишь аналитических методов недостаточно, так как состояние живых организмов и целых сообществ не всегда адекватно уровню загрязнения среды, к тому же оно варьирует у различных таксонов. Поэтому только средствами биологического мониторинга может быть получена ответная реакция живых организмов на изменение среды обитания. По сравнению с физико-химическими методами исследования биологический мониторинг имеет следующие преимущества:

- не требуется дорогостоящее оборудование;
- позволяет получить интегральные оценки;
- дает возможность характеризовать большие территории.

В данном пособии мы попытались обобщить различные методы биомониторинга растительных сообществ, как наиболее важного компонента окружающей человека природной среды в условиях техногенной нагрузки. Рассмотрены также результаты отечественных и зарубежных исследований реакции различных систематических групп растений на загрязнение.

Информация об изменениях в окружающей среде может быть получена при проведении химического анализа или с помощью работы с биологическими показателями живого объекта, т.е. методами биоиндикации. Биоиндикация – это обнаружение и определение биологически значимых антропогенных нагрузок на основе реакции на них живых организмов и их сообществ [51]. Под биоиндикаторами мы понимаем группу особей одного вида или сообщество, по наличию или состоянию которых судят об изменениях в среде, в том числе о величине концентраций токсических примесей. Есть мнение, что биоиндикаторами следует считать те виды, которые способны накапливать токсиканты без изменения внешних признаков, а виды, изменяющие свои параметры под влиянием антропогенного воздействия – биомониторамии. По Х.Х. Трассу [291], видами – индикаторами являются:

- доминирующие;
- широко распространенные;
- чувствительные к фактору воздействия;

- легко и быстро определяемые виды.

Мы считаем, что биоиндикатором может служить любой без исключения вид или биологический объект – от микроскопической клетки до экосистемы любого масштаба.

Схема основных типов реакций растительных систем на трех уровнях их организации, а также основные показатели их изменений представлены на рисунке. В соответствии с этой схемой представлены разнообразные примеры использования растений различных систематических групп для оценки состояния внешней среды. Основные таксономические группы растений (*грибы, водоросли, лишайники, мохообразные и сосудистые растения*) рассмотрены по единому плану, включающему следующие разделы:

- морфо-физиологические особенности группы;
- особенности аккумуляции тяжелых металлов;
- реакция организмов на действие загрязняющих веществ;
- использование данной группы растений в биоиндикации и биомониторинге.

Работа выполнена при поддержке научно-технической программы “Биоразнообразие” (220.66).

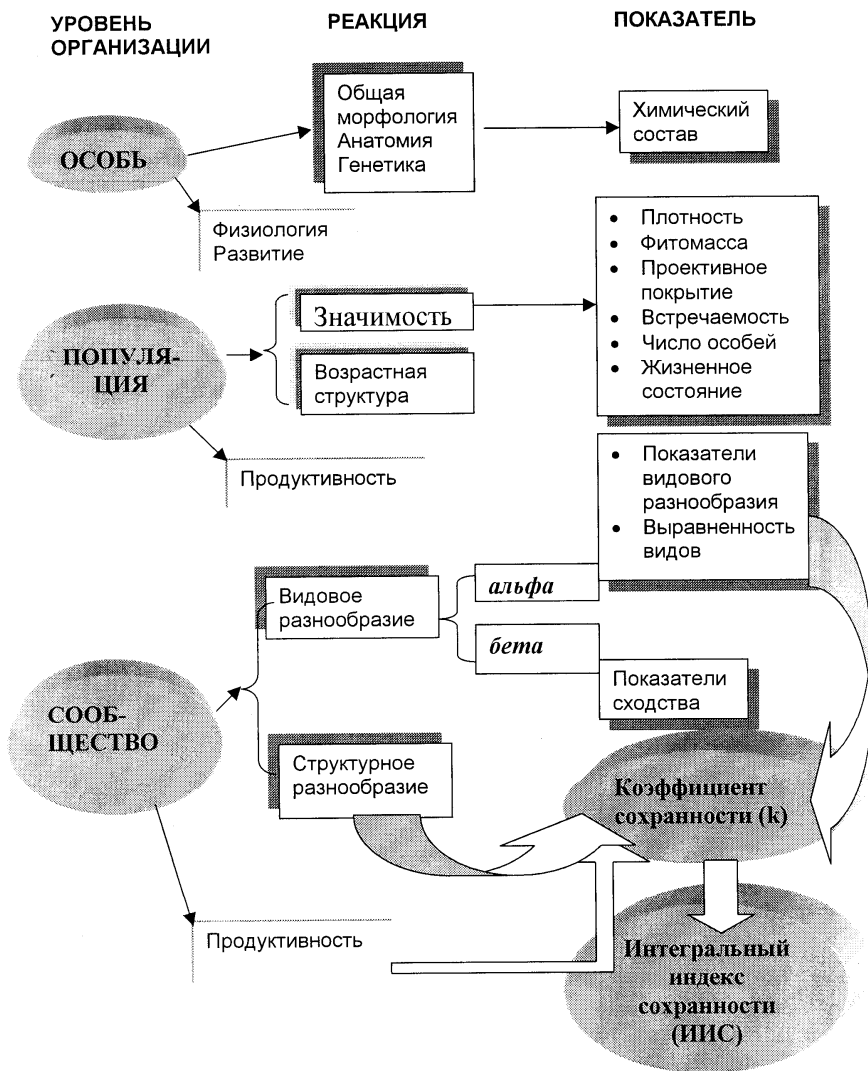


Схема основных параметров реакции растительных систем различных уровней организации

1. ГРИБЫ

1.1. Морфо-физиологические особенности грибов

Грибы представляют в биологии отдельное царство, но традиционно в классической систематике относятся к низшим растениям, хотя имеют ряд черт, присущих животным организмам (гетеротрофный обмен веществ, наличие хитина в клетках и др.). Грибы могут быть одноклеточными (часто микроскопические) или многоклеточными с различными формой, размерами и строением. У последних вегетативное тело (мицелий) представлено системой ветвящихся нитей (гиф, развивающихся на поверхности или внутри субстрата). На мицелии развиваются плодовые тела, состоящие из плотно переплетенных гиф и формирующих сложную ткань – плектенхиму.

Условно грибы разделяют на макромицеты – грибы с крупными плодовыми телами (шляпочные, дождевики, трутовики) и микромицеты – микроскопически малые грибы, образующие на поверхности субстрата налеты плесени, пятна. Грибы также способны обитать в почве или в водных средах.

Питание грибов осуществляется путем осмотического поглощения поверхностью мицелия питательных веществ в виде готовых органических живых или мертвых остатков. Вегетативное размножение происходит как правило участками мицелия или его специализированными фрагментами. Наиболее распространено бесполое размножение спорами, формирующимися в плодовых телах. Споры, как правило, разносятся ветром. Возможен половой путь размножения. Его характер, а также форма плодовых тел являются систематическими признаками грибов.

Грибы играют важную роль в группе редуцентов, способствующих минерализации органического вещества и образованию гумуса в экосистемах. По мнению автора работы [44], грибы занимают в экосистемах особый экогоризонт и в качестве редуцентов являются посредниками между живым и косным веществами биосферы, а в лесной подстилке 78 ... 90% биомассы

всех микроорганизмов составляет грибная биомасса. По принадлежности к питающему субстрату их делят на несколько экологических групп. *Микоризообразующие* – грибы, вступающие в симбиоз с корнями высших растений, способствуя их питанию. 80% видов высших растений образуют с грибами микоризу. Особые группы составляют грибы *копрофилы*, обитающие на богатых перегноем почвах (помет животных) и грибы – *карбофилы*, обитающие на старых корневищах. Имеются также и грибы – *хищники*, способные улавливать нематод и ими питаться. Ряд грибов (в основном *аскомицеты*) в симбиотической связи с клетками водорослей формируют особую систематическую группу – лишайники.

Типичные обитатели лесов – *ксилофилы* (дереворазрушающие грибы), поселяются на живой и мертвой древесине, разрушая лигнин и целлюлозу, играют важную деструктивную роль в круговороте веществ, способствуя нормальному распаду остатков древесных пород в биогеоценозе. Однако поселение грибов-паразитов на живых деревьях наносит вред здоровым или ослабленным особям, приводя их к усыханию.

1.2. Особенности аккумуляции тяжелых металлов грибами

Большая площадь соприкосновения поверхности гиф с частичками субстрата, а также осмотическое безбарьерное поглощение раствора обеспечивают способность грибного мицелия к накоплению избыточного количества загрязняющих веществ из окружающей среды. Нерегулярная, хотя и частая продукция долгоживущих гифов макромицетов в виде плодовых тел затрудняет исследование этой группы организмов. Однако в литературе имеется достаточное количество данных об изменении концентрации тяжелых металлов в телах грибов в зависимости от интенсивности действия источника загрязнения, о сравнительных межвидовых особенностях биологического поглощения металлов грибами, о величине концентрирования избыточных доз токсикантов.

Финскими учеными были проведены исследования по концентрированию плодовыми телами грибов металлов в урбанизированных местообитаниях [210]. Так, содержание свинца в грибах четырех видов на расстоянии 5 ... 10 и 200 м от дороги

существенно различалось: для *Psathyrella candolleana* – 11,9 и 4,1 ppm; *Agaricus sp.* – 13,2 и 7,7 ppm; *Lyophyllum connatum* – 41,0 и 5,8 ppm; *Pholiota squarrosa* – 12,7 и 5,1 ppm соответственно.

Исследования концентрирования ряда тяжелых металлов (Pb, Co, Cd, Cu, Fe, Mn, Zn, Ni) в 20 видах макромицетов в Чехословакии, проведенные во второй половине 70-х годов, выявили ряд особенностей в накоплении токсикантов в зависимости от трофической характеристики грибов [215]. Так, уровень загрязняющих веществ был максимальным в сапрофитах, промежуточным – в паразитирующих (особенно на сфагнуме) и микоризных (особенно связанных с елью и сосной) видах и минимальным в грибах, разлагающих древесину. О трофической зависимости микроэлементного состава также говорится в другой работе [210]: содержание свинца в микоризообразующих грибах урбанизированных местообитаний составляло ~ 6 ppm, в то время как у грибов-деструкторов – в 2,5 раза больше. Однако, в другой работе финских исследователей [284] приведены данные повышенного концентрирования свинца микоризообразующими видами грибов (*Boletus edulis* содержал до 300 ppm) по сравнению с видом деструктивной группы (*Macrolepiota procera* – 170 ppm), отобранных в окрестностях металлургического производства. отмечена способность аккумулировать такие токсичные элементы, как кадмий и ртуть в очень высоких концентрациях (Cd – 53 ppm в *B. edulis* и Hg – 3,6 в *M. procera*).

В работе [222] аномальная способность аккумуляции ртути иллюстрируется на примере другого вида – *Agaricus sp.*, образцы которого были отобраны в окрестностях хлорно-щелочного производства в радиусе 1 км (юго-западная часть Финляндии). Концентрация Hg достигала 72 ... 200 ppm, а при удалении на 8 км – 1,6 ... 4,7 ppm. Все отобранные грибы других видов содержали существенно меньше ртути.

Концентрация загрязняющих веществ в плодовых телах макромицетов зависит от концентрации их в субстрате. В сильно загрязненных местообитаниях у всех видов исследуемых грибов, произрастающих на сильнозагрязненном субстрате, было отмечено повышенное содержание меди, однако прямая зависимость между содержанием металла в органогенном слое почвы и в теле гриба наблюдалась не для всех видов [261]. Так, величины концентраций были близкими и составляли около 1000 ppm для *Lycoperdon pyriforme*, а для *Cantharellus cibarius* были как правило ниже –

50 ... 2500 ppm при концентрации меди в образцах субстрата – 20 ... 5000 ppm.

В мицелии *Agaricus edulis* обнаружена концентрация селена 7,8 ppm, при содержании его в почве в 65 – 100 раз больше; в *Boletus edulis* эта разница была еще выше – в 600 раз [278].

Другие данные, полученные при анализе 13 элементов в 130 видах грибов, отобранных в лесах на юге Швеции, доказывают факты преимущественного накопления некоторых элементов отдельными видами грибов [293, 294, 296]. Они также указывают на существенную роль в аккумуляции металлов разнообразных факторов внешней среды (кислотность почв, ее водонасыщенность). Так, градиент почвенной кислотности от 3,19 до 3,83 вызывал уменьшение поглощения рубидия видом *Amanita rubescens* от 549 до 219 ppm, а *Collybia peronata* – от 44 до 12 ppm, но не вызывал достоверных изменений в поглощении других элементов – Ca, Mg, Fe, K.

В работе [293] обобщены данные по особенностям концентрирования 16 металлов плодовыми телами грибов – обычных представителей таежных лесов (юг Швеции). Исследованные виды разжелены автором на две группы по способности к биоконцентрации, вычисленной по отношению к уровню содержания металла в общей массе. Наиболее частый случай – концентрирование одного элемента. Десять видов проявляли способность к накоплению более чем одного металла. Только три вида (*Mycena galopus*, *Lacrymaria velutina* и *Panaeolus campanulatus*) из 37 аккумулялировали повышенное количество более чем четырех металлов и были отнесены к биоконцентраторам. В этой работе приведены диапазоны варьирования концентраций для каждого металла. Так, для кадмия размах варьирования его концентраций был очень значительным и составлял 3000 ppm, для ванадия – 950 ppm, однако всего 10 для магния, менее 15 для хрома и 22 ppm для никеля. При этом низкие концентрации некоторых металлов были наиболее характерны для *Polyporus*, *Russula* и менее характерны для видов *Clitocybe*. Высокие концентрации металлов часто встречаются у видов pp. *Agaricus* и менее часты у *Boletus*, *Lactarius*. В итоге Тэйлером выражается сомнение в том, что малые концентрации металлов в субстрате являются единственной причиной низких концентраций в плодовых телах грибов. Это подтверждается примером различной аккумуляции меди двумя видами грибов – образцы *Clitocybe odora* содержали

428 ppm, в то время как *Gomphidius glutinosus* – всего 2 ppm, хотя отобраны на той же тропинке в смешанном сосново-буковом лесу.

Исходя из литературных данных, были выделены виды, обладающие свойством сильного концентрирования металлов из окружающей среды. Так, при содержании серебра в субстрате < 0,1 ppm *Agaricus campester* имели концентрацию 133 ppm, другие виды этого рода также имели повышенную концентрацию по сравнению с фоновым содержанием серебра, варьирующую от 10,5 до 52 ppm [153]. В образцах грибов, отобранных в Уэльсе, максимальное содержание металла 121 ppm отмечено у *Hygrocybe coccineus*, а минимальное (3,7 ppm) – у *H. cactus*. Одновременно зафиксированы содержания серебра: у *Agaricus macrosporus* – 30,4, у *Gomphidius roseus* – 23,2 ppm, что также указывает на межвидовые и межродовые различия в накоплении металлов.

Массовый анализ 421 вида грибов на содержание таллия [190] позволил выделить основную группу видов (85,4% от общего числа видов) по содержанию данного элемента, концентрация которого в телах грибов была в среднем в пределах 0,25 ppm при максимальных содержаниях металла 5,5 ppm.

В результате разделения плодовых тел грибов на шляпки и ножки было показано, что шляпки аккумулируют металлы в значительно больших количествах [215]. На аналогичную закономерность по распределению свинца в образцах грибов из загрязненных местообитаний указывается также в работе [214], однако в эталонных местообитаниях различий в распределении свинца по частям плодовых тел макромицетов не наблюдалось. Относительно кадмия имеются сведения о пятикратном превышении его содержания в пластинках гриба видов *Agaricus spp.* по сравнению с мякотью его шляпки [270]. В работе [268] показано, что средние концентрации кадмия и меди в пластинках грибов этого рода составляли 3,84 и 6,63, а в шляпках и ножках, вместе взятых – 1,54 и 3,85 ppm, соответственно.

О видовых различиях в накоплении тяжелых металлов, связанных с окраской грибов, упоминается в работе [162]. Установлено, что шампиньоны с желтеющей мякотью сильно аккумулируют кадмий, тогда как с краснеющей – не накапливают его. Зонтичные грибы аккумулируют медь, мухомор красный – ванадий, белый гриб и некоторые виды дождевиков – серебро.

Микромицеты *p. Penicillium* накапливают медь и никель в количестве 0,3 ... 0,4% от сухой массы мицелия, предварительно

тщательно отмытого от питательной среды, содержащей 20 и 50 ppm растворимой формы этих элементов [30]. Рассчитано также, что грибной биомассой одноразово может быть аккумулировано (без учета оборачиваемости биомассы за сезон) 250 ... 340 г/га меди и столько же никеля.

Механизм включения металла в ткань гриба носит двухфазный характер [172]. Сначала металл связывается независимо от обменных процессов клеточными стенками. Эта первая фаза характеризуется высокой скоростью и зависит от вида гриба, его вегетативного состояния, обуславливающего его состав и толщину клеточной стенки. Включение металлов в меланин-содержащие клетки происходит быстрее, чем в гиан-содержащие клетки. Во второй фазе происходит транспортировка металла внутрь клетки со скоростью, которая может снижаться в неблагоприятных условиях при пониженной температуре, а также при химическом воздействии ингибиторов клеточного обмена. Скорость второй фазы зависит также от видовой принадлежности и сорбционных свойств клеток.

1.3. Реакция грибов на действие загрязняющих веществ

По сравнению с другими почвенными организмами грибы характеризуются относительно высокой устойчивостью к токсическому воздействию загрязняющих веществ. Это может объясняться хорошей способностью грибов к регенерации (отдельный гриб может за 24 ч образовать мицелий длиной > 1 км) [89], а также выделением мицелием органических кислот, способных нейтрализовать действие токсикантов, в частности металлов, и образовывать с ними комплексы менее токсичные, чем свободные ионы [29].

Воздействие избыточного количества тяжелых металлов на грибы в естественных условиях изучалось также с точки зрения изменения числа видов, их встречаемости, биомассы мицелия, длине гиф и т.д. Наличие определенного числа видов микромицетов в почве тесно коррелировало с концентрацией в ней меди [177; 309]. По данным Рюлинга [26], на почве, содержащей 100, 1000 и 10000 ppm меди, было найдено 35, 25 и 15 видов макромицетов соответственно. Продукция спор в этих же местообитаниях также снижалась по мере

возрастания загрязнения [265]. В целом виды одного рода проявляли сходную реакцию, например, виды *p. Amanita* повреждались в одинаковой степени. Однако у видов *p. Cantharellus spp.* была обнаружена разная чувствительность к избыточным концентрациям меди в субстрате. По градиенту загрязнения 25 из 26 видов снижали свою численность и лишь один вид (*Laccaria laccata*) увеличивал. Видовой состав микромицетов также менялся. Некоторые виды, например *Paccilomyces farinosus*, были найдены в значительно загрязненных местообитаниях, а один вид (*Geomyces pannorum*) увеличивал свою численность в направлении к комбинату, вероятно, как отмечает автор работы [265], за счет низкой конкурентоспособности в незагрязненных местообитаниях. Такие широко распространенные виды, как *Pinicillium spp.* и *Oidiodendron spp.* были редкими в почве с высоким содержанием меди, что объясняется их высокой чувствительностью к этому металлу и ухудшением качества субстрата. В отличие от реакции макромицетов, число видов микромицетов изменялось не столь динамично в областях с очень высокими концентрациями меди.

Было показано [65], что в отличие от других антропогенных факторов, обычно вызывающих снижение образования грибных зачатков, при загрязнении тяжелыми металлами возможно даже некоторое увеличение численности почвенных грибов. Например, при постановке модельных опытов для дерново-подзолистых почв при загрязнении ртутью (50 ppm) и кадмием (100 ppm) число выделяемых грибных зачатков увеличилось с 47 до 235 тыс. на 1 г почвы. Подобные результаты были получены в работе [13]: общее стимулирующее действие металлов (Cu, Zn, Cd, Hg, Pb) в достаточном количестве (1 ... 10 ПДК) заключалось в увеличении числа микроскопических грибов в 7-17 раз. Вместе с тем, с повышением содержания тяжелых металлов в субстрате видовой состав грибов сокращался. Общая численность определялась развитием узкой группы микромицетов, толерантной к действию металлов.

Детальные исследования по распределению всех основных видов макромицетов [63], встречающихся в буковых лесах на юге Швеции, в зависимости от их эдафической принадлежности приведены [298, 299]. Все виды грибов были разбиты на пять групп в зависимости от двух факторов: содержания органического вещества в слое почвы на глубине 0 ... 5 см и процентной насыщенности почвы ионами металлов (степени нейтрализации), определяемой по формуле $100(K + Mg + Ca + Mn) : (H + K + Mg + Ca + Mn)$. При