

## Тема 2.

# БИОИНДИКАЦИЯ КАК МЕТОД ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

**Объяснение.** *Биоиндикация* – способ оценки антропогенной нагрузки по реакции на нее живых организмов и их сообществ. Наиболее часто при создании модели реакций экосистем на воздействие антропогенных факторов используют экотоксикологические эксперименты, в основе которых лежит исследование реакций отдельных (модельных) организмов на эти факторы – *биотестирование*. В качестве моделей (биотестов, индикаторов, тест-объектов) обычно используются живые организмы, выделенные в лабораторную культуру. Это универсальный метод в последние годы широко используется во всем мире для оценки качества объектов окружающей среды. Система наблюдений за реакцией биологических объектов на воздействие поллютантов называется *биологическим мониторингом*. Биологический мониторинг включает в себя наблюдение, оценку и прогноз изменений состояния экосистем и их элементов, вызываемых антропогенным воздействием.

В качестве фитоиндикаторов широко используются водоросли и лишайники. В культуре сине-зеленых водорослей выявляют процент мертвых и живых клеток, интенсивность флуоресценции, учитывают их биомассу и др. Удобным объектом при исследовании токсичности загрязнений и сточных вод в отношении численности водорослей являются одноклеточные зеленые водоросли (хлорелла, сценедесмус). У них определяют такие тест-функции, как содержание хлорофилла и соотношение разных типов хлорофилла. Широко известно, что многие лишайники способны чутко реагировать на загрязненность воздуха. На этом их свойстве основано особое направление индикационной экологии – *лихеноиндикация*.

Идеальная система мониторинга дает возможность количественно оценить состояние среды и ее изменения. Биологическая индикация позволяет оценивать степень загрязнения окружающей среды по существующим биологическим показателям.

Поскольку вариабельность органической жизни чрезвычайно велика, особенно важно для мониторинга выбирать такие организмы, которые являются наилучшими индикаторами изменений среды.

Для экотоксикологического картирования ландшафтов можно использовать биоиндикаторы, аккумулирующие загрязнители по безбарьерному типу, т.е. прямо пропорционально их концентрации во внешней среде (покровные ткани растений и животных для этого не подойдут). Для биотестирования загрязнения почв, вод и атмосферы наиболее приемлемы листья, цветки и другие органы растений.

Индикаторы должны удовлетворять ряду требований:

1. аккумуляция поллютантов не должна приводить к гибели тест-организмов;

2. численность тест-организмов должна быть достаточной для отбора, т.е. без влияния на их воспроизводство;

3. в случае долгосрочных наблюдений предпочтительны многолетние виды флоры;

4. биоиндикаторы должны быть генетически однородными (одновозрастными и характеризоваться близкими свойствами);

5. должна быть обеспечена легкость отбора проб и быстрота тестирования;

6. результаты биотестов должны быть точными и воспроизводимыми;

7. при выборе тест-организмов предпочтение следует отдавать регистрации функциональных, этологических, цитогенетических изменений отдельных индикаторных процессов биоты, а не только изменению ее структуры, численности или биомассы, т.к. эти последние являются более консервативными.

### **Фитоиндикаторы месторождений полезных ископаемых**

В разведке минеральных месторождений также используют растения-индикаторы. При этом учитываются геоботанические особенности растений. Некоторые виды флоры приурочены к специфическим геохимическим условиям среды.

Растения – *универсальные индикаторы* растут только на участках с повышенными содержаниями конкретных микроэлементов, являясь прямыми указателями наличия рудных тел и месторождений. К их числу, например, относятся галмейная фиалка (*Viola calaminaria*) и галмейная ярутка (*Thlaspi calaminaria*) для цинка, а также некоторые виды родов *Astragalus*, *Stanteya* и *Xylorrhiza* для селена.

Растения – *локальные индикаторы* определенных микроэлементов широко распространены, однако частота их встречаемости заметно увеличивается на участках, обогащенных тем или иным микроэлементом. Таким образом, растения этой группы в определенных условиях могут маркировать скрытые под почвой или наносами зоны рудной минерализации.

Лучше других изучены растения – локальные индикаторы меди, принадлежащие к семействам *Caryophyllaceae* и *Labiatae*, а также ко мхам (*Bryophyta*). В Швеции по «медистым» мхам было открыто три месторождения сульфидных руд, содержащих медь. Несколько медных месторождений было обнаружено в Замбии по растению *Osimum nomblei*. В настоящее время выявлены растения-индикаторы повышенного содержания в почвах и породах хрома, марганца, никеля, меди, цинка, селена, железа, кобальта, олова, свинца, серебра, золота и т.д. Содержание этих элементов в золе растений-индикаторов увеличивается до 10–15%.

Другая группа геоботанических особенностей растений включает изменения формы и окраски цветов и листьев, характера опушения растений, плотности стеблей, ветвей и листового покрова, связанные с повышенным содержанием в почвах определенных микроэлементов. Под влиянием высоких содержаний некоторых элементов в почвах у растений даже могут возникнуть различные заболевания, выражающиеся в появлении уродливых форм, а в отдельных случаях геохимические аномалии определенных микроэлементов могут быть частично или полностью лишены растительности. В таблице 1 приведен характер изменений, наблюдавшихся у растений в связи с повышенным содержанием элементов, а также виды-индикаторы отдельных элементов.

Таблица 1. Индикаторы насыщенности почв химическими элементами

Элемент	Вид-индикатор	Индикационный признак
Zn	Виды родов фиалки ( <i>Viola</i> sp.), ярутки ( <i>Thlaspi</i> sp.)	Хлороз листьев и отмирание их кончиков, появление белых недоразвитых и карликовых форм.
Co	Кроталярия ситниковая ( <i>Crotalaria juncea</i> ), смолёвка ( <i>Silene</i> sp.)	Появление белых пятен на листьях.
Cu	Отдельные виды маков ( <i>Papaver</i> sp.)	Посветление листьев, омертвление их кончиков, покраснение стеблей, образование стелющихся, вырождающихся форм. В отдельных случаях полное исчезновение растительности.
Se	Астрагал ложный ( <i>Astragalus glycyphylloides</i> )	Обилие
Ca	Положительные индикаторы: мордовник русский, астра ромашковая, Венерин башмачок настоящий, ежовник, или биюргун меловой, полынь солянковая. Отрицательные индикаторы: сфагновые мхи	Обилие
N	Амарант запрокинутый, крапива двудомная, гармала обыкновенная, паслен сладко-горький, лебеда розовая, марь гибридная, смородина черная, борец клубочковый, пролесник многолетний, черемуха птичья, или обыкновенная	Обилие
Cr		Пожелтение листьев, в некоторых случаях поредение растительного покрова, вплоть до полного его исчезновения.

Mo, Fe		Покраснение и пожелтение листьев и стеблей.
Ni		Вырождение и исчезновение некоторых форм, появление белых пятен на листьях, уродливые формы, редукция лепестков венчика.
Mg		Покраснение стеблей и черенков листьев, скручивание и отмирание краев листьев.
Th, U, Ra		В небольших дозах ускоряют рост и развитие растений. При высоких концентрациях ведут к появлению уродливых форм побегов, карликовости, появлению темноокрашенных или осветленных листьев.
Pb		Поредение растительного покрова, появление угнетенных форм, развитие аномальных форм у цветов и соцветий.
Nb		Появление белого налёта на стеблях и листьях некоторых видов растений.
Be		Уродливые побеги у молодых особей сосны.
F		Чрезвычайно раннее пожелтение и опадение листьев.
B		Задержка в росте, созревании семян, карликовость, стелющиеся формы. Темно-зеленые листья, опаленность краев листьев. При наличии высоких концентраций в почве полное или частичное исчезновение, растительности.

### Индикаторы грунтовых вод

Среди высших растений наибольший интерес в целях гидроиндикации представляют *фреатофиты*, использующие грунтовые воды. Среди фреатофитов выделяют *гликофильные* (используют пресные и слабосоленоватые воды) и *галофильные* (используют минерализованные воды) виды. Корневые системы фреатофитов достигают капиллярной каймы и зеркала грунтовых вод. Каждый вид фреатофита характеризуется оптимальной глубиной залегания грунтовых вод, при которой наблюдается его максимальное развитие. Одним из наиболее надежных индикаторных признаков является величина проективного покрытия и биомассы гидроиндикаторов. Е.А. Востокова (1957) в специальной таблице приводит основные гидроиндикационные группы растений для пустынь и полупустынь в зависимости от солености вод (от пресных до соленых) и глубины их залегания (от 0 до 15 м).

## Индикаторы механического состава почв

В зависимости от содержания физической глины по механическому составу почвы делятся на песчаные, супесчаные, суглинистые и глинистые. Индикатором почв среднего механического состава (суглинистых) служит, как правило, зональная растительность. Экологический ряд древесных пород от песчаных почво-грунтов к глинистым образуют: сосна – дуб – липа – береза – осина.

Псаммофиты наиболее многообразны в песчаных пустынях, где они являются хорошими индикаторами стадий зарастания песка, мощности и происхождения песчаных отложений.

Индикаторами каменистых почв служат петрофиты. Одни из них образуют подушкообразные формы (виды родов акантолимон, колючелистник), другие, приуроченные к осыпям, имеют корневища, стелющиеся побеги, дернины (лисохвост ледниковый, наголоватка бесстебельная).

## Индикаторы богатства почв

Растительность отражает содержание в почве доступных растениям подвижных соединений основных элементов питания (кальция, азота, фосфора, калия, серы, магния) и микроэлементов (бора, марганца, меди и др.). Постоянными индикаторами богатства почвы являются эвтрофные растения, приуроченные к богатым почвам и достигающие на них наилучшего развития и максимального обилия. Переменными индикаторами богатства почв служат мезотрофные растения, распространенные на почвах среднего богатства. К отрицательным индикаторам богатства почв относятся олиготрофные растения, приспособленные к существованию в условиях бедного минерального питания.

Шкала богатства почв, разработанная для лугов Л.Г. Раменским (1938), включает 16 ступеней (табл. 2).

Таблица 2. Шкала богатства почв Л.Г. Раменского

Ступени	Индикаты	Индикаторы
1–3	Очень бедные (олиготрофные) почвы подзолистого и сфагново-болотного типа, рН 4–4,5	Осока малоцветковая, водяника, или вероника черная, багульник болотный. Мохообразные: политрихи – можжевельниковый и волосконосный, сфагновые мхи. Лишайники: кладония приальпийская, пельтигера пузырчатая.
4–6	Бедные почвы, нередко супесчаные и песчаные, сильновыщелоченные, либо торфяные, рН 5–5,5	Осоки – шаровидная и волосистоплодная, белоус торчащий, овсяница овечья. Мохообразные: политрихи – обыкновенный и стройный, плеврозий Шребера.

7–9	Небогатые (мезотрофные), слабокислые, подзолистые, дерново-подзолистые, подзолитоглеевые почвы, рН 5,5–6,5	Осока водная, трясунка средняя, вейник наземный, полевица тонкая. Мохообразные: гилокомий блестящий, ритидиладельфус трехгранный.
10–13	Почвы повышенного богатства (серые лесные почвы, выщелоченные черноземы), рН 6,0–7,5	Осоки – низкая и лисья, ежа сборная, овсяница луговая.
14–16	Богатые почвы (черноземы, каштановые почвы), рН 7,0–7,5	Осоки – мохнатая и двурядная, кадения сомнительная, люцерна хмелевая, шалфей мутовчатый. Мохообразные: мний лесной, родобрий, коллиэргон сердцевидолистный.

### **Индикаторы влажности почв**

Л.Г. Раменским (1938) выделены 120 ступеней увлажнения почв. В его шкале увлажнения значения ступеней следующие: 1–17 ступени – увлажнение пустынное, 18–30 – полупустынное, 31–39 – сухостепное, 40–46 – среднестепное, 47–52 – лугостепное, 53–60 – сухолуговое, 61–63 – свежелуговое, 64–67 – влажнолуговое, 68–76 – сыроватолуговое, 77–88 – сыролуговое, 89–93 – болотнолуговое, 94–103 – болотное, 104–109 – местообитания прибрежно-водной растительности, 110–120 – местообитания водной растительности. Детально разработаны растительные индикаторы относительных ступеней увлажнения почв лугов, пастбищных и сенокосных угодий для Европейской части России, Урала, Сибири, Алтая (табл. 3).

### **Индикаторы кислотности почв**

Большое значение в почвообразовательном процессе имеет кислотность почв. Для различных районов Европейской части России известны списки растений-индикаторов кислотности почв. Примеры растений-индикаторов кислотности почв для смешанных лесов приведены в таблице 4.

### **Индикация природного засоления почв**

В основу составления списка индикаторов засоления почв берется определение средней амплитуды засоления корнеобитаемого слоя почвы для основных растений отдельного географического района. Наибольшее количество галофитов встречается в полупустынях и пустынях. Они относятся чаще к семействам маревые, портулаковые, гребенчиковые (солерос травянистый, хамилион бородавчатый, лебеда белая, или кокпек, петросимония толстолистная, поташник каспийский, ежовник, или биюргун солончаковый, сарсазан шишковатый). В группу индикаторов засоленных почв можно включить также виды родов сведы, прутняка, многие виды рода

солянки, гребенщиков – щетинистоволосного и тонкоколосного, селитрянку сибирскую.

Таблица 3. Растительные индикаторы относительных ступеней увлажнения почв Центра и Юго-востока Европейской части России (Раменский, 1938, 1956)

Увлажнение	Ступени	Индикаторы
Ничтожное	1–17	Полынь серо-белая, ежовник, или биюргун солончаковый, солянка деревцевидная, или боялыч, рогац, или эбелек туркестанский.
Крайне недостаточное	18–30	Полынь приморская, рогац, или эбелек песчаный, житняк пустынный, ковыль сарептский, колосняк ветвистый.
Недостаточное	31–39	Полынь австрийская, осока узколистная, или уральская, келерия гребенчатая.
Умеренно недостаточное	40–46	Полынь сантонинная, тонконог, или келерия сизая, ковыль перистый, тимьян Маршалла, или чабрец, наголоватка паутиная.
Нейтральное	47–52	Тимофеевка степная, таволга, или лабазник обыкновенный, или земляной орешек, жабрица порезниковая, люцерна серповидная, шалфей мутовчатый, зопник клубненосный.
Умеренно влажное	53–63	Осока низкая, свиной пальчатый, коротконожка перистая, полынь горькая, василек фригийский.
Средневлажное	64–76	Осока пальчатая, лисохвост луговой, овсяница высокая, колосняк Пабоана, вейник тростниковидный.
Умеренно избыточное	77–88	Осока черноколосная, бекмания обыкновенная, кидия сомнительная, или жгун-корень, таволга вязолистная, герань болотная, астра солончаковая.
Избыточное	89–93	Осока черная, хвощ болотный, пушица влагилищная, двукисточник тростниковый.
Сильно избыточное	94–103	Осока пузырчатая, шейхцерия болотная, болотница, или ситняг болотный, тростянка овсяницеvidная.
Обводненное	104–109	Шалфей понижающий, манник большой, калужница болотная, сусак зонтичный, камыш озерный.
Водное	109–120	Кувшинка белоснежная, рдест пронзеннолистный.

Таблица 4. Растения-индикаторы кислотности почв

Кислотность почвы	Виды-индикаторы
Сильно- (рН 3,5–4,5) и умереннокислые (рН 4,5–5,5) почвы	Ожика волосистая, осока малоцветковая, белоус торчащий, полевица тонкая, лерхенфельдия извилистая, багульник болотный, вереск обыкновенный, щавель малый, или щавелек. Мхи: сфагнум желтоватый, плеврозий Шребера.
Среднекислые почвы (рН 4,5–5,5)	Ожика многоцветковая, вейник сидящий, осока пепельно-серая, или сероватая, полевица собачья, погремок малый, щитовидный обыкновенный, ромашник непахучий, торица полевая.

Слабокислые почвы (рН 5,5–6,5)	Луговик дернистый, двукисточник тростниковый, лютик едкий, погремок отклоненный, гравилат речной, подмаренник болотный, кошачья лапка двудомная. Мхи: сфагнум позднейший, мний вздутый.
Нейтральные почвы (рН 6,5–7,3)	Осока повислая, трясушка средняя, лисохвост луговой, овсяница луговая, сныть обыкновенная. Мхи: аулакомний болотный, дрепаноклад грубый.
Умеренно щелочные почвы (рН 7,3–8,0)	Осока мохнатая, тимофеевка луговая, гвоздика пышная, люцерна хмелевая. Мхи: камптотетий желтеющий, фортелла извилистая.
Щелочные почвы (рН выше 7,5–8,0)	Песколюб песчаный, очиток едкий, горчица полевая, мать-имачеха обыкновенная.

Л.Г. Раменский (1956) выделял 5 степеней засоления почв и связанных с ними растений-индикаторов (табл. 5).

Таблица 5. Фитоиндикаторы степени засоления почв на Юго-востоке Европейской части России

Степень засоления и характеристика почвы	Индикаторы
Степень засоления	
I. Слабозасоленные, солончаковатые сероземные, каштановые солонцовые почвы. Реакция почвенных растворов – слабощелочная (рН 7,5–8,3), в водной вытяжке из верхнего полуметрового слоя содержится 0,05% сульфатов и 0,01– 0,03% хлоридов.	Полынь белоземельная, терескен, грудница татарская, солянка деревцевидная, или боялыг.
II. Среднезасоленные почвы; обычно это луговые солончаковатые почвы (рН 7,5–8,3), сульфаты – 0,1–0,3%, хлориды – 0,05–0,1%.	Ежовник, или биюргун солончаковый, полынь малоцветковая, ситник Жерара, солянка корявая, или жесткая, морковник обыкновенный.
III. Сильнозасоленные почвы (солончаки) (рН до 9,1), сульфаты – до 0,05%, хлориды – до 0,3%.	Полынь малоцветковая, хамилион бородавчатый, франкения жестковолосая, или сайгачья трава, солянка Комарова, горькуша солончаковая.
IV. Резко засоленные почвы (солончаки). Содержание водорастворимых солей в поверхностном слое почвы – несколько процентов.	Хамилион черенковый, млечник приморский, сарсазан шишковидный, соляноколосник прикаспийский, или карабаркар, солерос европейский.
V. Злостные солончаки (шоры)	Растительность сильно изрежена или полностью отсутствует.
Тип засоления	
Хлоридное	Сар-сазан шишковидный, солерос европейский, гребенщик многоветвистый.

Сульфатно-хлоридное	Поташник каспийский, гребенщик щетинистоволосый, солянка узловатая.
Хлоридно-сульфатное	Прибрежница солончаковая, селитрянка Шобера, соляноколосник, или карабакар прикаспийский, саксаул черный, петросимония толстолистная.
Сульфатное	Ежовник, или биюргун канделябрный, и безлистный, нанофитон ежовый.
Солонцы	Ксерогалофиты: полынь малоцветковая, камфоросма марсельская.
Солонцеватые почвы	Ксеромезофиты: солнечник русский, лихнис сибирский.
Загипсованные почвы	Гипсофит ежовник, или биюргун гипсовый.

### Биотесты на высших растениях

Для биотестирования отработано немало методов на различных культурах: белой горчице (*Sinapis alba* L.), озимой и яровой пшенице (*Triticum aestivum* L.), овсе (*Avena* L.), гречихе (*Fagopyrum* L.), огурце (*Cucumis* L.), кресс-салате (*Lepidium sativum* L.), сое (*Glycine* L.), льне (*Linum* L.), еже сборной (*Dactylis glomerata* L.).

Горчица служит индикатором на противодвудольные гербициды, овес и рис используют как индикаторы почвенных противозлаковых гербицидов, редис является традиционным биотестом при исследовании остатков пестицидов в почве и конечной продукции растениеводства, на огурце и гречихе тестируют гербициды – производные мочевины и фенилкарбаматы. Тест длится 10 дней. При наличии вредных веществ снижается процент всхожести и ингибируется рост зародышевых корешков. К недостаткам данного теста можно отнести неспецифичные изменения, затрудняющие выявление конкретного загрязнителя.

Действие пестицидов на злаки обнаруживается по их влиянию на морфогенез растений и проявляется в изменениях типа морфозов. У озимой пшеницы при высокой пестицидной нагрузке (2,4-Д, диален, лонтрел, тилт, байлетон, метафос) наиболее распространенным и устойчивым типом морфоза является «мутовка», т.е. увеличение числа колосков на уступе колосового стержня.

### Фитотесты на проростках

Корневые системы растений очень отзывчивы на воздействия среды, поэтому учет загрязнения проводится в основном по ростовым реакциям корня. Для биотеста можно применять молодые растения огурца, кукурузы, горчицы и др.

*Заложение биотеста.* Откалиброванные по размеру и выполненности сортовые семена раскладывают по 10–15 штук в чашки Петри на стекло, обернутое фильтровальной бумагой. В каждую чашку Петри вводят по 15–20

мл испытуемой жидкости (образцы водных сред из городского водопровода, ближайших водоемов, вода из отстойников очистительной станции), а в контрольный вариант – дистиллированную воду.

При оценке загрязнения твердого субстрата (почвы, твердых осадков и т.д.) навеску субстрата (3–5 г) помещают на дно чашки Петри, равномерно распределяют по дну, закрывают субстрат бумажным фильтром и заливают 20–30 мл дистиллированной воды на сутки. На следующий день на поверхность фильтровальной бумаги раскладывают семена. Чашки Петри помещают в термостат при температуре 26°C на четверо суток.

*Измерения.* Учитывают длину главного корня и длину зоны боковых корней у 10 однородных проростков. Измерения проводят с помощью линейки или полоски миллиметровой бумаги. Данные вносят в таблицы 6 и 7. Санитарно-токсикологически значимое воздействие принимают при степени ингибирования более 30%.

Таблица 6. Учет длины главного корня и зоны боковых корней у проростков

Вариант опыта	Длина главного корня, см													Длина зоны боковых корней, см												
	Повторности																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ	$x_{cp}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ	$x_{cp}$		
Контроль																										
Вода из водопровода																										
Вода из реки																										

Примечание: Σ – сумма,  $x_{cp}$  – средняя величина.

Таблица 7. Влияние водных сред на рост главного корня проростков огурца

Вариант опыта	Средняя длина главного корня		Средняя длина зоны боковых корней	
	см	%	см	%
Контроль (дистиллированная вода)		100		100
Вода из водопровода				
Вода из реки				

**Задание.** Выполнить эксперимент по методике фитотеста на проростках, проанализировать и графически оформить результаты.