

# БИОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

## БИОИНДИКАЦИЯ И БИОТЕСТИРОВАНИЕ

Под редакцией  
О. П. Мелеховой и Е. И. Сарапульцевой

*Допущено  
Министерством образования и науки Российской Федерации  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки «Биология»  
и биологическим специальностям*

3-е издание, стереотипное



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2010

УДК 57(075.8)  
ББК 28.0:28.080я73  
Б633

Авторы:

О. П. Мелехова, Е. И. Сарапульцева, Т. И. Евсеева, В. М. Глазер,  
С. А. Гераськин, Ю. К. Доронин, А. А. Киташова, А. В. Киташов, Ю. П. Козлов,  
И. А. Кондратьева, Г. В. Коссова, С. В. Котелевцев, Д. Н. Маторин,  
С. А. Остроумов, С. И. Погосян, А. В. Смуров, Г. Н. Соловых, А. Л. Степанов,  
Н. А. Тушмалова, Л. В. Цаценко

Рецензенты:

декан экологического ф-та Российского университета дружбы народов  
д-р биол. наук, проф. *Н. А. Черных*;  
зав. кафедрой аквакультуры Астраханского технического университета  
(Дмитровский филиал) д-р биол. наук, проф. *Н. А. Головина*;  
декан ф-та «Инженерная экология» Московского государственного  
университета инженерной экологии проф. *Н. Е. Николайкина*;  
проф. кафедры зоологии беспозвоночных биологического ф-та  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,  
д-р биол. наук *Н. Н. Марфенин*

**Биологический контроль окружающей среды: биоиндика-**  
ция и биотестирование : учеб. пособие для студ. высш. учеб.  
заведений / [О. П. Мелехова, Е. И. Сарапульцева, Т. И. Евсе-  
ева и др.]; под ред. О. П. Мелеховой и Е. И. Сарапульцевой. —  
3-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. —  
288 с.

ISBN 978-5-7695-7033-9

В учебном пособии изложены теоретические основы и методология биологической диагностики окружающей среды. Входящие в пособие лабораторные работы (более 40) содержат современные методы биоиндикации и биотестирования. Книга по структуре и содержанию представляет собой основу практикума к таким дисциплинам, как «Экология» и «Биологический мониторинг», входящим в учебные планы многих специальностей биолого-экологической направленности.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 57(075.8)  
ББК 28.0:28.080я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

© Коллектив авторов, 2007

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2007

ISBN 978-5-7695-7033-9

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2007

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие подготовлено коллективом авторов — известных специалистов в области биологического контроля состояния окружающей среды, имеющих большой опыт преподавания соответствующих дисциплин. В нем впервые представлен столь полный набор разнообразных методов биоиндикации и биотестирования, часть которых разработана авторами пособия.

Книга включает фундаментальные теоретические основы и методологию биологического контроля окружающей среды (гл. 1 — 3). Теоретические главы завершаются списком литературы, куда вошли монографии, учебники, учебные пособия, статьи известных ученых и специалистов в области биоэкологии и охраны окружающей среды.

Практическая часть пособия содержит более 40 лабораторных работ по основным методам биоиндикации и биотестирования (гл. 4). Работы приведены в форме, доступной для воспроизведения их студентами на практических занятиях продолжительностью 2—4 академических часа. Большинство лабораторных работ сопровождается рисунками, справочным материалом и рабочими таблицами, пронумерованными соответственно номерам работ; к каждой работе дается список литературы по изучаемому в ней методу биологического контроля окружающей среды. В гл. 5 пособия приведены общие принципы применения компьютерных технологий в биологическом мониторинге.

Считаем необходимым поблагодарить всех авторов, поддержавших идею создания учебного пособия по биологическому мониторингу для студентов вузов, а также предложивших свои методики и собственный взгляд на проблему оценки качества окружающей среды.

Хотим выразить искреннюю признательность и благодарность профессорам О. Ф. Филенко и Б. И. Сынзынысу за профессиональную критику и многочисленные предложения по совершенствованию пособия.

*О. П. Мелехова, Е. И. Саранульцева*

## ВВЕДЕНИЕ

Биологический контроль окружающей среды включает две основные группы методов: биоиндикацию и биотестирование. В предлагаемом учебном пособии подробно рассматриваются возможности использования в биоиндикационных исследованиях живых организмов — индикаторных видов, которые в силу своих генетических, физиологических, анатомических и поведенческих особенностей способны существовать в узком интервале определенного фактора, указывая своим присутствием на наличие этого фактора в среде. Применение в качестве биоиндикаторов растений, животных и даже микроорганизмов позволяет проводить биомониторинг воздуха, воды и почвы. Благодаря специальным индексам и коэффициентам результаты биоиндикации оказываются достоверными и сопоставимыми.

В пособии приводятся основные задачи и приемы биотестирования окружающей среды, требования к подбору тест-объектов, которыми могут быть как целые организмы, так и молекулы, клетки, органы и ткани, из которых они состоят.

Чтобы в дальнейшем различать очень близкие по целям применения и смысловому использованию понятия, поясним значения терминов «биоиндикация» и «биотестирование».

**Биоиндикация (*bioindication*)** — обнаружение и определение экологически значимых природных и антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов непосредственно в среде их обитания. Биологические индикаторы обладают признаками, свойственными системе или процессу, на основании которых производится качественная или количественная оценка тенденций изменений, определение или оценочная классификация состояния экологических систем, процессов и явлений. В настоящее время можно считать общепринятым, что основным индикатором устойчивого развития в конечном итоге является качество среды обитания.

**Биотестирование (*bioassay*)** — процедура установления токсичности среды с помощью тест-объектов, сигнализирующих об опасности независимо от того, какие вещества и в каком сочетании вызывают изменения жизненно важных функций у тест-объектов. Для оценки параметров среды используются стандартизованные реакции живых организмов (отдельных органов, тканей, клеток или молекул). В организме, пребывающем контрольное время в условиях загрязнения, происходят изменения физиологических,

биохимических, генетических, морфологических или иммунных систем. Объект извлекается из среды обитания, и в лабораторных условиях проводится необходимый анализ. Живой организм может тестироваться также в специальных камерах или на стендах, где создаются условия изучаемого загрязнения (что очень важно для выявления реакций организма на то или иное доминирующее загрязнение или целый комплекс известных загрязняющих веществ на данной территории обитания).

Хотя подходы очень близки по конечной цели исследований, надо помнить, что биотестирование осуществляется на уровне молекулы, клетки или организма и характеризует возможные последствия загрязнения окружающей среды для биоты, а биоиндикация — на уровне организма, популяции и сообщества и характеризует, как правило, результат загрязнения. Живые объекты — открытые системы, через которые идет поток энергии и круговорот веществ. Все они в той или иной мере пригодны для целей биомониторинга.

Контроль качества окружающей среды с использованием биологических объектов в последние десятилетия оформился как актуальное научно-прикладное направление. При этом необходимо отметить дефицит учебной литературы по этим вопросам и большую потребность в ней.

## ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

---

Под экологическим качеством среды обитания человека понимают интегральную характеристику природной среды, обеспечивающую сохранение здоровья и комфортное проживание человека.

Природная среда, в которой мы живем, формировалась в течение многих сотен миллионов лет. Современный лик Земли и состав основных сред обитания живых организмов — почвы, воздуха, воды — созданы и поддерживаются благодаря жизнедеятельности и взаимодействию мириадом живых существ. Искусственно создать полноценную среду обитания для человека не удастся. Только биота (совокупность разнообразных живых организмов) поддерживает и регулирует качество среды — параметры, необходимые для жизни (температуру, влажность, солевой состав, соотношение газов в атмосфере, климат). Сейчас науке известны не менее 7 млн биологических видов, и ученые считают, что эта цифра составляет только часть от реально существующего разнообразия обитателей Земли.

Поскольку человек адаптирован\* и может комфортно существовать только в современном биологическом окружении, в природных экосистемах, понятие «экологическое качество среды» подразумевает сохранение экологического равновесия в природе (относительной устойчивости видового состава экосистем и состава сред жизни), которое и обеспечивает здоровье человека.

Необходимо различать цели и способы нормирования и оценки качества среды обитания человека по основным физико-химическим параметрам, с одной стороны, и экологического прогноза будущего изменения состояния экосистемы и здоровья людей в условиях антропогенного пресса — с другой.

Для общей оценки состояния окружающей среды и определения доли участия отдельных источников в ее загрязнении приме-

---

\*Адаптация — совокупность морфофизиологических, поведенческих, популяционных и других особенностей данного биологического вида, обеспечивающая возможность специфического образа жизни в определенных условиях внешней среды.

няют санитарно-гигиенические и токсикологические нормативы (предельно допустимые концентрации — ПДК — поллютантов, предельно допустимые уровни воздействия — ПДУ). Однако для прогноза результатов влияния антропогенных факторов как на экосистемы, так и на здоровье людей необходимо учитывать также и многие показатели, характеризующие реакцию отдельных организмов и экосистемы в целом на техногенное воздействие.

Реакции живых систем на разнообразные химические и физические факторы и их сочетание характеризуются такими особенностями, как интегральность и кумулятивность множества воздействий, парадоксальные эффекты слабых доз на организмы животных и растений, наличие цепных процессов и отдаленных последствий локальных влияний на различные «этажи» сложно организованных экосистем. Стохастической, трудно предсказуемой, является и реакция организмов людей, живущих в условиях техногенных искусственных экосистем.

В настоящее время общепринято, что одним из неперенных условий «устойчивого» социально-экономического развития являются сохранение природной среды обитания человека и ее восстановление после разрушительных воздействий.

Необходимо отметить, что живым системам (организмам, их сообществам и целым экосистемам) свойственна способность к саморегуляции, самоочищению, адаптации. Этим, в частности, определяется и экологический прогноз. Устойчивость экосистем, например, зависит от многообразия видов, входящих в них, от соотношений численности видов, представляющих различные трофические уровни, от репродуктивных свойств организмов и регуляции численности каждой популяции межвидовыми отношениями в сообществе и абиотическими факторами.

Экологическую опасность, или риск, следует оценивать с учетом не только характера и силы антропогенного воздействия, но и биологических свойств реагирующей системы. Соответственно этому имеется две группы методов экологического мониторинга (слежения за состоянием экосистем): физико-химические и биологические (биомониторинг). Каждый из видов мониторинга имеет свои ограничения. Для качественной оценки и прогноза состояния природной среды необходимо их сочетание. Таким образом, физико-химический и биологический мониторинг не исключают, а дополняют друг друга.

Антропогенные загрязнения действуют на живые организмы, и в том числе на человека, в самых различных сочетаниях, комплексно. Их интегральное влияние можно оценить только по реакции живых организмов или целых сообществ. Прогноз действия на человека загрязненной воды, химических добавок в пище или загрязненного воздуха правомочен, если в оценку токсичности входят не только аналитические методы, но и биологическая диагно-

стика действия среды на животных. Кроме того, многие ксенобиотики (чуждые для биосферы вещества) накапливаются в организме, и в результате длительное воздействие даже малых концентраций этих веществ вызывает патологические изменения в организме. Наконец, известен парадоксальный эффект малых доз многих биологически активных соединений, когда сверхслабые дозы (ниже ПДК) оказывают на организм более сильное действие, чем их средние дозы и концентрации.

Универсальным показателем изменения гомеостаза\* тест-организма является состояние стресса при попадании из «чистой» среды в «загрязненную».

Понятие «стресс» весьма различно используется во многих областях науки. Впервые в качестве научного термина оно было введено в медицину Г.Селье в 1936 г. и вскоре проникло в обиходный язык как обозначение неспецифического психического напряжения. Г.Селье (1979) определяет стресс как реакцию на повышенную нагрузку, которая проявляется в синдроме, слагающемся из всех неспецифически вызванных изменений внутри биологической системы.

В биологии под стрессом понимается реакция биологической системы на экстремальные факторы среды (стрессоры), которые могут в зависимости от силы, интенсивности, момента и продолжительности воздействия более или менее сильно влиять на систему.

Стресс можно разделить на два различно действующих типа. Эустресс характеризуется физиологическими адаптивными реакциями, которые вызываются в организме биоэнергетическими процессами, когда в критических ситуациях живому существу необходимо приспособиться к изменившимся условиям среды. Дистресс означает патогенные процессы, возникающие, как правило, при постоянных нагрузках или усилиях, которые организм не в состоянии регулировать короткое или длительное время. В какой мере тот или иной стрессор обуславливает эустресс или дистресс, зависит от многочисленных факторов, например от сочетания экзогенных раздражителей и внутреннего состояния организма.

Реакционная способность (норма реакции) организма по отношению к воздействующим стрессорам зависит прежде всего от его генетической конституции. При возникновении стресса большую роль играет также фактор времени, связанный как с развитием чувствительности к стрессу, так и с продолжительностью воздействия какого-либо эффективного стрессора на протяжении различных периодов жизни.

---

\*Гомеостаз — постоянство внутренней среды организма; гомеостатические механизмы обеспечивают приспособление (адаптацию) к среде и сохранение жизнеспособности организма.

Опасность антропогенных стрессоров состоит в том, что биологические системы — будь то организмы, популяции или биоценозы — недостаточно адаптированы к ним. Антропогенные стрессоры создаются с такой скоростью, что в живых системах часто не успевают активизироваться соответствующие адаптационные процессы. Многие антропогенные факторы среды потому и становятся опасными стрессорами, что они отличны по величине, интенсивности, продолжительности и моменту воздействия от той обычно существующей в природе “нормы”, к которой адаптированы биологические системы. В результате они часто влияют на диапазон толерантности\*, что нередко приводит к превышению допустимой нагрузки на организмы и распаду биологической системы.

Следует также обратить внимание на то, что в природе на организм воздействует не один стрессор, а целый комплекс нарушающих факторов (комплексное стрессовое воздействие среды). При этом, разумеется, какой-либо отдельный фактор может временно или постоянно доминировать. В связи с этим понятно, что реакции организмов на стрессоры в лабораторном эксперименте не всегда совпадают с наблюдающимися в естественных условиях. Поэтому исследования комбинированного воздействия средовых нагрузок, т. е. комплексного стрессового воздействия среды, становятся в последнее время принципиально важными для установления допустимой нагрузки и стабильности биологических систем в нарушенной среде со многими антропогенными стрессорами.

Стрессовое воздействие среды приводит к отклонению основных параметров организма от оптимального уровня.

В настоящее время оценка степени экологической опасности традиционно осуществляется путем определения в окружающей среде отдельных потенциально вредных веществ или воздействий и сравнения полученных результатов с законодательно установленными для них предельно допустимыми величинами. В то же время такой способ контроля имеет ряд существенных недостатков. Аналитические методы, как правило, трудоемки, не всегда экспрессны, требуют дорогостоящего, иногда дефицитного оборудования и реактивов, а также высококвалифицированного обслуживающего персонала. Но главный их недостаток в том, что эти методы не могут гарантировать достоверной оценки экологической опасности, сколь бы широким не был спектр анализируемых веществ. Ведь важны не сами уровни загрязнений и воздействий, а те биологические эффекты, которые они могут вызвать и о которых не может дать информацию даже самый точный химический или физический анализ.

---

\* Толерантность — терпимость, устойчивость. Способность организма переносить неблагоприятное влияние того или иного фактора среды.

Заметим, что используемые в практике экологического и санитарно-гигиенического нормирования показатели (предельно допустимые концентрации — ПДК, предельно допустимые дозы — ПДД, предельно допустимые уровни — ПДУ), всегда базирующиеся на токсикологических исследованиях с тестированием отдельных биообъектов, не могут учитывать изменений токсичности загрязнителей за счет эффектов синергизма или антагонизма при сочетанном действии антропогенных факторов. Эти нормативы не отражают зависимости токсического действия загрязнения от физических факторов среды, не учитывают процессы естественных трансформаций веществ в окружающей среде или исчезновения их в ходе детоксикации среды от конкретных загрязнителей. Поэтому наряду с физико-химическими методами необходимо использовать методы биологического контроля и диагностики — биоиндикацию и биотестирование, дающие объективные интегральные оценки качества среды и основания для прогноза состояния экосистем.

Биологические методы контроля качества среды не требуют предварительной идентификации конкретных химических соединений или физических воздействий, они достаточно просты в исполнении, многие экспрессны, дешевы и позволяют вести контроль качества среды в непрерывном режиме. Вместе с тем после выявления общей токсичности образцов почвы или воды для определения ее причин следует применить аналитические методы. Традиционные физико-химические методы позволяют также оценить вклад отдельных предприятий или иных источников загрязнения в интегрированное техногенное воздействие на природу.

Проведение интегральной оценки качества среды предлагается для определения состояния биоресурсов, разработки стратегии рационального использования региона, определения предельно допустимых нагрузок для экосистем региона, решения судьбы районов интенсивного промышленного и сельскохозяйственного использования, загрязненных радионуклидами, и т.п.; выявления зон экологических бедствий; решения вопроса о строительстве, пуске или остановке определенного предприятия; оценки эффективности природоохранных мероприятий, введения очистных сооружений, модернизации производства и др.; применения новых химикатов и оборудования; создания рекреационных и заповедных территорий.

Технический пресс как следствие НТР выдвигает в качестве одной из важнейших природоохранных задач проблему «уравновешивания» результатов антропогенного воздействия на окружающую среду. Соблюдение этого условия — единственный способ выживания для человечества.

Реализация основных принципов устойчивого развития цивилизации в современных условиях возможна лишь при наличии соответствующей информации о состоянии среды обитания в от-

вет на антропогенное воздействие, собранной в ходе проведения биологического мониторинга. Оценка качества среды является ключевой задачей любых мероприятий в области экологии и рационального природопользования. Сам термин «мониторинг» (от англ. *monitoring* — контроль) подразумевает проведение мероприятий по непрерывному наблюдению, измерению и оценке состояния окружающей среды. Комплексный подход в проведении биологического мониторинга (сочетание методов биоиндикации и биотестирования, использование объектов разных уровней организации) при систематическом наблюдении позволяет судить о перспективах изменения структуры сообществ, продуктивности популяций и устойчивости экосистем по отношению к антропогенным факторам.

Объектами мониторинга являются биологические системы и факторы, воздействующие на них. При этом желательна одновременная регистрация антропогенного воздействия на экосистему и биологического отклика на воздействие по всей совокупности показателей живых систем. Необходимо проведение многофакторного анализа с учетом наиболее типичных антропогенных воздействий (например, химических веществ), а также изменений природных факторов среды, уровень которых меняется вследствие антропогенного влияния. В первую очередь учитывается изменение численности видов и видового состава ценозов. Важно фиксировать также возможные изменения в природных популяциях, например нарушения эмбрионального развития (уродств) и симметрии взрослых особей в пределах популяции. Необходимо выявлять быстрый «отклик» организмов или популяций и результаты стойких последствий, так как часть изменений может быть отрегулирована биосистемами.

Примеры применения методов биоиндикации и биотестирования в практике экологической экспертизы природных водоемов и питьевых водоисточников демонстрируют, что пороговые концентрации химических поллютантов, нарушающие жизнедеятельность организмов-биотестов, находятся ниже принятых значений ПДК. Постоянное присутствие поллютантов даже в низких концентрациях приводит к снижению видового разнообразия гидробионтов за счет исчезновения наиболее чувствительных к качеству воды видов. Такие изменения в биоценозах устанавливаются методами биоиндикации — определением индексов и показателей сапробности.

Параллельное исследование показателей здоровья больших групп населения, проживающих на загрязненных территориях и использующих загрязненную воду и сельскохозяйственные продукты, достоверно свидетельствует о снижении (по сравнению со средним по региону) уровня продолжительности жизни, повышении общей и младенческой смертности, а также уровня забо-

леваемости людей, поражения иммунной системы, печени и других органов.

Основополагающим принципом биологического мониторинга является установление оптимального — контрольного — уровня, любые отклонения от которого свидетельствуют о стрессовом воздействии. Обычно при оценке оптимума по какому-либо одному параметру возникает вопрос о том, будут ли данные условия оптимальными также для других характеристик организма. Однако если исследуемые параметры характеризуют основные свойства организма в целом, то их оптимальный уровень оказывается сходным. Например, столь разные и, казалось бы, совершенно независимые параметры, как асимметрия морфологических признаков, показатели крови, интенсивность потребления кислорода, ритмика роста и частота хромосомных aberrаций, могут изменяться синхронно, когда при определенном стрессовом воздействии в действительности изменяется наиболее общая базовая характеристика организма — гомеостаз развития.