

Министерство образования  
Российской Федерации  
Уральский  
государственный  
педагогический университет

---

**Введение  
в экологическую  
токсикологию**

**МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА**

---

**Екатеринбург 1993**

**Составители: В. С. Безель, В. Н. Большаков**

**ВВЕДЕНИЕ в экологическую токсикологию: Метод. разработка /Урал. пед. ун-т; Сост. В. С. Безель, В. Н. Большаков. Екатеринбург, 1993. 46 с.**

**Рецензент: д-р биол. наук, проф. Г. И. Таршис**

## **Введение в экологическую токсикологию**

**Составители: Безель Виктор Сергеевич**

**Большаков Владимир Николаевич**

**Редактор И. М. Леушина**

**План 1993 г.**

**Подписано в печать 15.10.93. Формат 60x80/16. Бумага писчая. Печать ротапринтная. Усл. печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 200 экз. Заказ №208**

**Уральский государственный педагогический университет**

**Отдел множительной техники и издательских систем**

**Адрес отдела множительной техники и издательских систем: 620219 Екатеринбург, ГСП-135, просп. Космонавтов, 26.**

**© Уральский государственный  
педагогический университет, 1993**

## ВВЕДЕНИЕ

### Что такое экологическая токсикология

До последнего времени развитие производительных сил общества подчинялось требованиям экономики. Получение максимального экономического эффекта определяло пути развития промышленности и сельского хозяйства. Природоохраные аспекты этих процессов носили подчиненный характер. Сегодня происходит смена приоритетов. Требования экологической чистоты и безопасности всех видов человеческой деятельности выходят на передний план, часто определяя направление развития отдельных отраслей и технологий.

Среди комплекса биологических, медицинских, научно-технических и других дисциплин, призванных решать эти проблемы, ведущее место принадлежит экологии и ее новому направлению — ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ТОКСИКОЛОГИИ.

В 1976 г. Международным комитетом по проблемам окружающей среды (СКОПЕ) было принято определение экологической токсикологии, согласно которому под ЭКОТОКСИКОЛОГИЕЙ понимается междисциплинарное научное направление, связанное с токсическими эффектами химических веществ на живые организмы, преимущественно на популяции организмов и биоценозы, входящие в состав экосистем. Оно изучает источники поступления вредных веществ в окружающую среду, их распространение в окружающей среде, действие на живые организмы. Человек, несомненно, является наивысшей ступенью в ряду биологических мишней.

Упоминание в этом определении человека не случайно. Ведь первоначально сфера техногенного загрязнения включала лишь ограниченные пространства бытовой и производительной деятельности человека. Именно человек оказался первой жертвой собственной неосмотрительности.

История таких медицинских направлений, как общая токсикология, промышленная и коммунальная гигиена, насчитывает более сотни лет.

В настоящее время только в нашей стране существует бо-

лее 1 000 различных санитарно-гигиенических нормативов (пределно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в воде, воздухе, продуктах питания). Все они призваны обеспечить безопасность человека в разнообразных условиях труда и быта.

Иначе обстоит дело с защитой природной среды от воздействия различных антропогенных факторов, включая техногенные загрязнения. Основанное на экологической токсикологии, нормирование антропогенных нагрузок принципиально отличается от санитарно-гигиенического нормирования, которое, однако, продолжает оставаться единственным экологическим критерием при проектировании, строительстве и эксплуатации промышленных предприятий.

Сегодня ответ на вопрос, в какой мере санитарно-гигиенические нормативы обеспечивают защиту природных экосистем при техногенном загрязнении, остается открытым.

Приведем примеры. Значения ПДК антропогенных радионуклидов в воде и воздухе защищают не только человека, но и другие виды живых организмов. Иначе обстоит дело при загрязнении атмосферы сернистым газом. При длительном воздействии этого загрязнителя в концентрациях, не превышающих санитарно-гигиенические нормы для воздуха и не приводящих к поражению человека, происходит активное поражение хвойных лесов. Аналогичным образом лишайники гибнут в городской атмосфере, которая по гигиеническим стандартам считается допустимой для человека. Нередки случаи использования населением питьевой воды, в которой могут выжить далеко не все пресноводные организмы.

При некоторых загрязнениях почвы нефтью или тяжелыми металлами может сильно пострадать почвенная микро- и мезофауна (этим подорвана продуктивность таких почв), в то время как сельскохозяйственная продукция с этих участков может соответствовать санитарным нормам для продуктов питания. Сегодня ясно, что далеко не все природные экосистемы могут быть защищены нормами, определенными для человека.

В экологической токсикологии само определение «ЗА-

**ГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ»** отличается от принятого в гигиене. Широко употребляемый в экологической токсикологии термин «ЗАГРЯЗНЕНИЕ» включает в себя все токсические и химические поступления в биосферу продуктов человеческой деятельности.

Антропогенное загрязнение может быть определено как неблагоприятное изменение естественной природной среды, имеющее своим следствием изменение сложившихся распределений потоков энергии, вещества, радиационного фона и проявляющееся в изменении состояния биоты.

В отличие от медицинской токсикологии при оценке влияния техногенных загрязнителей необходимо учитывать специфику природных экосистем, которая выражается в следующем:

- протяженность биологических систем во времени и пространстве;
- неоднозначность реакции экосистем на токсическое воздействие и возможность существования у них нескольких мест стабильных состояний;
- нелинейный характер их динамики;
- особое значение окружающей среды как активного фактора, влияющего на поведение токсикантов в отдельных компонентах биоты, их фиксацию и деструкцию в природных системах, определяющих уровни поступления загрязнителей в живые организмы.

Самостоятельность любого научного направления определяется наличием трех непременных его компонент:

**1**

специфическим предметом исследования,

**2**

совокупностью применяемых методов и методик,

**3**

поставленными задачами.

**ПРЕДМЕТОМ  
изучения экологической токсикологии  
являются биологические системы надорганизменного уровня,  
подверженные техногенному загрязнению.**

Естественно, что теоретической основой экотоксикологии служат фундаментальные закономерности функционирования и структуры природных систем популяционного и биоценотического ранга, активно разрабатываемые современной теоретической экологией. Важнейшее значение имеет общая концепция устойчивости и стабильности экологических систем.

Все это определяет своеобразие применяемых МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ и МЕТОДИК. Физиологические и биохимические нарушения, вызванные действием загрязнителей на растительные и животные организмы, рассматриваются в качестве первичных токсических эффектов, имеющих следствием нарушение популяционных и биоценотических процессов. Отметим, что в настоящее время мы можем располагать оперативной информацией о содержании токсических веществ в отдельных компонентах биоты, а также оценками физических и химических параметров природной среды.

Выявление значимости этих показателей для состояния изучаемых биологических систем и прогноза их будущего требует разработки специальных методических подходов, использующих виварные исследования, эксперименты и наблюдения в природных биоценозах, изучение нарушенных, загрязненных территорий, методы математического моделирования и экстраполяции. Эти и другие подходы отражают своеобразие методологии экологической токсикологии в качестве самостоятельного научного направления.

**ВАЖНЕЙШЕЙ ЦЕЛЬЮ**, имеющей огромное прикладное значение, является разработка теоретических основ и основополагающих концепций взаимодействия природных экосистем и производственной деятельности человека.

Было бы неправильно при этом ограничивать задачи эко-

логической токсикологии — только изучением потоков техногенных веществ. Сегодня мы можем располагать данными по содержанию токсикантов в отдельных компонентах биоты. Все это не отражает еще прямого биологического эффекта. Оценка значимости этих явлений для судьбы популяций и экосистем является важнейшей задачей экологической токсикологии..

Научно обоснованное предвидение судьбы биоценозов, подверженных влиянию техногенного загрязнения, позволяет обеспечить рациональную эксплуатацию природных экосистем, основываясь на допустимых уровнях техногенного воздействия.

Таким образом, круг проблем, связанных с оценкой уровней накопления техногенных элементов в компонентах биоты и последствиями этого для природных систем надорганизменного ранга (популяции, сообщества, экосистемы), является содержанием экологической токсикологии.

Всякое новое научное направление базируется на основополагающих достижениях смежных наук. Мы имеем в виду прежде всего фундаментальные закономерности, установленные в общей экологии и медицинской токсикологии.

Необходимо отметить, что отечественные исследования в области экологии, охраны природы, медицинской токсикологии и гигиены еще в 30 — 40-е гг. были не только на уровне мировых, но и в значительной мере определяли его. Достаточно упомянуть основополагающие работы С. С. Четверикова по генетике популяций, работы Г. Ф. Гаузе по экологии популяций, В. Н. Сукачева и его концепцию биогеоценоза, а также исследования ведущего российского токсиколога и гигиениста Н. В. Лазарева.

Социально-экономическая специфика последующего развития нашего общества, выразившаяся в существенной по сравнению с западными странами задержке научно-технического развития, в выбранной стратегии развития крупномасштабных производств в условиях обширных территорий и казавшейся беспредельной сырьевой базы, в отсутствии внимания и поддержки важнейших направлений биологической науки, — все это

не могло не сказаться на современном состоянии экологической токсикологии у нас в стране.

Отметим еще одно обстоятельство, определяющее специфику экологической токсикологии. Если историю существования нашей планеты условно обозначить как один час, то господство человека с его материальной культурой продолжалось какие-то доли секунды. Последние по счету резкие климатические перемены (например, плейстоценовое оледенение), сопоставимые по масштабу воздействия с антропогенезацией среды, сопровождались такими низкими скоростями изменения климата, что пояса растительности успевали стянуться к экватору или переместиться сообразно изменению распределения осадков. Иначе обстоит дело при современных темпах антропогенезации природной среды, с которыми темпы эволюции несопоставимы. Это привело к тому, что в последнее время пришло осознание того, что чисто эволюционный подход при решении проблем современной экстоксикологии недостаточен.

На протяжении последних десятилетий было положено начало специфическим методам анализа биологических систем, опирающимся на системно-структурные методы исследования. Эти методы исходят из признания того, что основным биологическим принципом является структурная организация и что две определенным образом составленные системы образуют новую систему, свойства которой не аддитивны свойствам ее составляющих.

Таким образом, системный подход, применяемый в современной экологической токсикологии, можно рассматривать как общее методологическое направление, включающее изучение живых систем в аспекте их взаимодействия.

Примером такого понимания может служить концепция структурных уровней природной среды, среди которых чаще всего выделяют следующие:

- молекулярно-генетический,
- клеточно-тканевый,
- онтогенетический,
- популяционно-видовой,

- биоценотический (биосферный).

Каждому уровню биологической интеграции присущи особые способы взаимодействия между специфическими для данного уровня единицами. С переходом к высшим уровням механизмы взаимодействия, свойственные нижележащим уровням, могут сохранить свое функциональное значение, но ведущую роль приобретают новые типы взаимодействия, по отношению к которым первые находятся в подчиненном положении.

Отличительной особенностью экологической токсикологии является то, что под влиянием техногенных загрязнителей в экологических системах проявляются неблагоприятные эффекты на различных уровнях — от молекулярно-генетических до биоценотического. Наблюдаются эффекты увеличения частоты хромосомных нарушений и мутаций, изменение ферментативной активности отдельных систем организма, снижение репродуктивных способностей и продолжительности жизни организмов, изменение половозрастной структуры популяций, видового состава сообществ, смена доминирующих видов, продуктивности биоценозов и т. д.

Изучение подобного широкого спектра токсических проявлений возможно лишь при комплексном подходе с участием широкого круга специалистов, представляющих все направления биологической науки. Этим определяется характерный междисциплинарный статус экологической токсикологии.

Важнейший социальный заказ общества — разработка стратегии рационального природопользования — сегодня может быть выполнен лишь при активном развитии комплекса биологических, медицинских, научно-технических направлений науки, среди которых значительное место принадлежит экологической токсикологии.

## **1. ПОПУЛЯЦИОННЫЙ ХАРАКТЕР ЗАВИСИМОСТИ «ДОЗА — ЭФФЕКТ»**

Экологическая токсикология относится к классу токсикологических наук, в центре которых находится изучение механизмов токсического действия и токсических эффектов химических веществ, жизненно необходимых организмам (эндогенных), но поступающих в избыточном количестве или чужеродных (ксенобиотики, поллютанты).

Однотипность первичных механизмов токсического действия и в ряде случаев близость изучаемых объектов (лабораторные животные и животные из природных популяций) различных направлений медицинской токсикологии, а также несомненный в прикладном аспекте их нормативный характер предопределяют и близость методологических подходов. Казалось бы, проще всего сравнить наличие токсических эффектов в группах организмов, подвергшихся токсическому воздействию, и интактных.

Однако широко применяемое в медицине сопоставление средних регистрируемых показателей (физиологических, функциональных, биохимических и др.) в контрольных и опытных группах организмов можно считать лишь общей предварительной оценкой токсического проявления. Необходимо знать, как влияет увеличение токсической нагрузки на выраженность токсического эффекта. Только в этом случае можно обоснованно говорить о безопасных уровнях воздействия.

С этой целью токсикологи оперируют зависимостью «доза — эффект». Если в качестве аргумента в таких зависимостях рассматривать концентрации токсических веществ (в воздухе, воде, в тканях организма), а в качестве эффекта — меру токсического проявления, то дозовая зависимость имеет S-образный вид (рис. 1). При низких уровнях воздействия наблюдается слабое токсическое проявление, затем наступает резкое возрастание токсических эффектов. Последний участок дозовой зависимости вновь характеризуется медленным нара-

станием эффектов вплоть до полного поражения биологической системы.



Рис. 1. Типичный вид зависимости  
«доза — эффект»

В современной токсикологической практике подобные зависимости носят градированный характер, т. е. в количественной форме отражают изменение того или иного показателя состояния организма как функции внешнего токсического воздействия. Такой вид дозовой зависимости может быть получен, например, в экспериментах по снижению активности некоторых ферментов по мере возрастания концентрации тяжелых металлов.

Однако сами по себе градированные показатели не определяют еще однозначно статус организма, т. е. не позволяют сделать заключение о наличии поражения. Действительно, можно ли считать организм пораженным, если какая-нибудь его ферментная система инактивирована, например, на 30 %? А если поражение больше или меньше? Видимо, существует

предел поражения системы, превышение которого однозначно (альтернативно) определяет гибель организма.

Такой переход к альтернативному выражению эффекта поражения предполагает известный критерий вредности градированного показателя, т. е., по существу, подразумевает диагностику состояния «норма — патология», основанную на концепции пороговости поражающего действия токсиканта.

Отметим важнейший в токсикологии факт перехода количественных изменений к новому качественному состоянию. Каждый переход соответствует переходу с одного уровня организации биологических систем на более высокий (в нашем примере переход от молекулярного уровня — подавление активности ферментов к организменному — гибель организма). При этом любой альтернативный эффект (наличие или отсутствие поражения) отражает реакцию более высокого уровня организации на критическую степень градированного эффекта, регистрируемого на предыдущем уровне.

#### **ПОНЯТИЕ НОРМЫ**

Проблема оценки диапазона действующих доз для биологических систем различного ранга сложна и неразрывно связана с понятием нормы, которое является основополагающим в медицинской и экологической токсикологии, требующим конкретного количественного выражения, поскольку определяет чрезвычайно важную грань, отделяющую «нормальное» функционирование системы от «ненормального» (патологического) состояния.

В процессе эволюционного развития у растительных и животных организмов закреплена способность адекватно реагировать на изменение среды обитания, вызываемое влиянием природно-климатических факторов. В любом случае такая компенсация неблагоприятного воздействия направлена на поддержание стабильности биологической системы на молекулярном, клеточно-тканевом, организменном и популяционном уровнях организации.

Естественно, что понятие нормы должно включать эти адаптационные возможности системы, поэтому о норме следует

говорить как о некотором диапазоне значений параметров, характеризующих функционирование системы при возможных изменениях природных факторов.

К воздействию антропогенных факторов, включая техногенное загрязнение, биологические системы различного ранга эволюционно не готовы. Их реакция на техногенный пресс носит неспецифический характер в рамках традиционных, эволюционно закрепленных механизмов компенсации. Лишь в этом случае адаптационные способности могут быть превышены, и параметры, характеризующие функционирование биологических систем, могут выйти за рамки допустимого.

Чаще всего в качестве допустимой нормы принимается диапазон, зависящий двум стандартным отклонениям ( $M \pm 2S_m$ ), выход за пределы которого диагностируется как проявление поражения. В ряде случаев доверительный интервал нормы определяется при помощи критерия Стьюдента  $M \pm t_m$ , где  $t_m$  — ошибка среднего, а конкретное значение параметра  $t$  находят с учетом числа наблюдений и принятого уровня доверительной вероятности.

В токсикологической литературе упоминают и другие методы оценки границы нормы:  $M \pm S_m$  или  $M \pm 1,5 S_m$ .

Понятие нормы в экологической токсикологии столь же неопределенно. Популяция как система взаимосвязанных особей уже в силу исходной разнокачественности отдельных ее эколого-функциональных группировок характеризуется разнообразием их ответа на любое внешнее воздействие. Существует своеобразный резерв, наследственно закрепленной внутриструктурной изменчивости, который проявляется, с одной стороны, в широком спектре реакций отдельных субпопуляционных группировок на техногенное воздействие, с другой — обусловлен наличием специфических популяционных механизмов компенсации неблагоприятных изменений структуры и функций популяции, вызванных загрязнением. Этот резерв является необходимым компонентом нормы реакции популяции на техногенное загрязнение среды.

В связи с изложенным популяционный характер зависи-

ности «доза — эффект» должен учитывать следующие обстоятельства:

- количественная оценка дозы предполагает учет меры токсического воздействия, отражающей не просто средние уровни токсических веществ в объектах внешней среды, а специфику популяции как гетерогенного объекта, элементы которого испытывают токсическое воздействие различной интенсивности. Например, это может быть общее содержание или поток токсикантов, подразделенный на отдельные компоненты, соответствующие структуре популяции;
- аналогичным образом оценка эффекта должна включать некоторые интегральные показатели состояния популяции, непосредственно контролирующие стабильность ее структуры и функции, например показатели плодовитости и плодоношения, выживаемости, продуктивности, занимаемой площади или численности и т. д.;
- при оценке эффектов надорганизменного уровня необходимо исходить из первичных проявлений токсичности на молекулярном, тканево-клеточном и организменном уровнях;
- большую, чем для других систем, роль внешней среды в реализации эффектов популяционного уровня.

Техногенные вещества, загрязняющие природные экосистемы, включаются в биологический круговорот за счет жизнедеятельности популяций растений и животных. При этом популяции, будучи системами взаимосвязанных гетерогенных группировок особей, модифицируют эти потоки в соответствии с их эколого-функциональной спецификой, определяя тем самым разнородность накапливаемых уровней токсикантов и ответные реакции на воздействие. В этом случае наряду с большинством животных, имеющим некоторый средний уровень загрязнителей, всегда будут присутствовать в выборке

особи с максимальными и минимальными содержаниями токсикантов. Естественно, что мера токсического воздействия (то, что понимается нами в качестве дозы) не может быть характеризована некоторым средним содержанием токсического элемента. Более правильно в качестве популяционной меры токсического воздействия рассматривать некоторую интегральную функцию  $f(x)$ , описывающую статистическое распределение содержаний токсических элементов в организмах, составляющих популяцию или отдельную выборку (спектр концентраций). Здесь  $x$  — содержание вещества во внутренних средах организма, например концентрация тяжелых металлов в крови.

Анализ содержания токсических веществ в тканях или цельных организмах, составляющих однородную выборку в популяции, показывает, что статистическое распределение таких концентраций не симметрично (не может быть описано нормальным законом распределения). Наиболее хорошо такой спектр концентраций аппроксимируется логнормальным законом, при котором доля особей с высоким содержанием токсикантов превышает долю с минимальным содержанием. Такого же мнения придерживаются и авторы, изучавшие распределение свинца, ртути, кадмия в волосах людей (см. рис. 2).

В проблемах экологической токсикологии отмеченный факт асимметрии распределений концентраций загрязнителей в объектах биоты имеет особое значение. Дело в том, что далеко не всегда при техногенном загрязнении природных биогеоценозов удается отметить существенное изменение средних уровней токсикантов в отдельных компонентах биоты. Обычно такие изменения не выходят за пределы установленной нормы. Нужны значительные воздействия, чтобы эти уровни достигли предельно допустимых концентраций или превысили их. Однако в силу несимметричности распределения концентраций загрязнителей в популяции даже незначительные изменения средних содержаний приводят к существенным увеличениям встречаемости особей с содержаниями токсикантов, превышающими

критические. Это обстоятельство (количество пораженных особей) особенно важно при оценке состояния популяций.



Таким образом, в экологической токсикологии в качестве аргумента в зависимости «доза — эффект» следует рассматривать спектр концентраций токсических веществ в популяционной выборке, описываемой логнормальным законом распределения. В этом случае экотоксикологический эффект, отражающий состояние популяции и ее будущее, определяется количеством (долей) особей, у которых возможно проявление признаков интоксикации.

Отмеченная дозовая зависимость и возможные ее модификации относятся прежде всего к популяции мелких млекопитающих. Однако в рамках экологической токсикологии правомерны и иные формы зависимости состояния других компонент биоты от интенсивности токсического фактора. Несколько примеров.

По образному выражению В. Н. Сукачева, лесная подстилка является «зеркалом» биоценоза. Мощность горизонтов L и F лесной подстилки может рассматриваться как интегральный показатель интенсивности важнейших деструкционных процессов в лесном биоценозе, определяющих его общее состояние.

Зависимость «расстояние от источника эмиссии — толщина подстилки» может рассматриваться в качестве дозовой зависимости, где расстояние в упрощенном виде отражает обратную величину меры токсического воздействия. Толщина подстилки в этом случае соответствует интегральному показателю состояния биоценоза.

Рассмотренные дозовые зависимости для животных отражают либо прямое токсическое воздействие загрязнения, приводящее к поражению функционирования отдельных компонент биоты (число пораженных особей, интенсивность деструкционных процессов и т. д.), либо его опосредованное влияние через деградацию среды обитания и снижение или изменение кормовой базы (например, снижение численности вида).

С другой стороны, в литературе описаны случаи, относящиеся главным образом к насекомым-фитофагам — когда строительное влияние загрязнения приводит к погашению защитных возможностей растений (в частности, древесных). Это снижает их способность противостоять действию фитофагов, что является благоприятным для насекомых и может привести к росту численности последних.

Из общих соображений следует, что для системы «насекомые-фитофаги — древесные насаждения» является характерным результирующее влияние двух противоположно направленных тенденций: снижение численности из-за прямого токсического воздействия на насекомых и возрастание их численности в силу ослабления защитных свойств древостоя. Массовое размножение ксилофагов (стволовые вредители леса) начинается при такой степени ослабления хвойных пород, при которой отмирают лишь отдельные ветки деревьев. Эти усло-

вия могут сложиться на некотором отдалении от источников загрязнения. В более загрязненной зоне, где степень отмирания деревьев выше, кормовая база, используемая ксилофагами, далеко не лимитирует их численность, массовых размножений уже не наблюдается в силу проявления прямого токсического эффекта техногенных выбросов.

Многообразие токсических проявлений на уровне популяций растительных и животных организмов, их сообществ или цельных биоценозов является отражением сложности изучаемых экологической токсикологией систем и их своеобразия. Если вводимые нами показатели меры токсического воздействия и эффекта для млекопитающих во многом аналогичны тем, которые применяются в гигиене (так называемые эпидемиологические подходы), то зависимости, отражающие численность объектов, интенсивность деструкционных процессов и другие, применимы лишь в экологической токсикологии.

Необходимо еще раз подчеркнуть этим не столько своеобразие изучаемых в экологической токсикологии объектов и систем, сколько обязательный надорганизменный ранг тех показателей, которыми оперирует это направление экологии.

## **2. ТОКСИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **2. 1. Молекулярно-генетический и клеточный уровни токсических эффектов**

На молекулярно-генетическом уровне организации биологических систем происходит репродукция в неизменном или измененном виде молекулярных структур, ответственных за жизненные процессы, в которых закодирована генетическая информация (нуклеиновые кислоты, белки). Эти структуры обеспечивают передачу наследственной информации от поколения к поколению. Молекулярно-генетический уровень в экологической токсикологии выступает в качестве элементарной основы токсических эффектов, которые реализуются на последующих уровнях биологической интеграции

#### **РЕАКЦИЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КЛЕТОК**

##### **Генетические эффекты**

Под влиянием некоторых загрязнителей природной среды возможны изменения структуры элементарной наследственной единицы — ГЕНА. Это явление называют мутацией гена. Различные загрязнители (некоторые пестициды, фенолы, нитраты и ряд других) могут вызывать разнообразные мутации от точечковых до серьезных перестроек и изменения числа хромосом. Если такие изменения наследственного аппарата происходят в половых клетках, то наблюдаются отклонения в развитии потомства или даже его гибель.

В случае мутаций в других клетках организма (соматических) также возможны отрицательные последствия, часто приводящие к развитию раковых заболеваний.

Важнейшей особенностью генетических эффектов является их беспороговость. Это значит, что даже при очень малых содержаниях токсических веществ всегда существует возмож-

ность мутаций и их неблагоприятных последствий. Часто для оценки мутагенного загрязнения природной среды используют особые генетические тесты. Для этого специальные клеточные культуры длительное время экспонируют в природной среде (например, в загрязненной воде рек и озер). Последующий подсчет количества обнаруженных мутаций позволяет оценить общую мутагенную среды и ее опасность для биоты.

Одним из индикаторов генотоксической опасности среды обитания, максимально близких к человеку по организации генома, физиологическим особенностям и реакции на мутагенные факторы, являются млекопитающие, и прежде всего синантропные виды (например, домовая мышь). Как правило, в этом случае объектом исследования являются клетки костного мозга. Обитание этих животных в непосредственной близости к жилью человека, поступление в их организмы тех же мутагенов-загрязнителей делают этот вид животных хорошей моделью для оценки генотоксической опасности среды обитания для человека. В этой связи нужно подчеркнуть, что в последнее время появляется все больше данных статистично существования причинной связи между хромосомными нарушениями и злокачественными заболеваниями, а также о более высокой коррелированности частоты хромосомных нарушений с канцерогенным эффектом химических веществ, чем это наблюдается при генных мутациях.

#### Воздействие на биологические мембранны

Биохимические механизмы токсического действия большинства загрязнителей связаны с нарушениями структуры и функции биологических мембран. Такие токсические вещества, как ДДТ, фенолы, мочевина, сернистый газ, озон, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и другие, способны нарушать проницаемость клеточных мембран. Это ведет у растений к нарушению водного режима, нарушению клеточного биосинтеза молекул, а также к повышенному перекисному окислению липидов. Отмечены и другие нарушения, связанные с деградацией клеточных мембран, такие, как фотодеструкция

хлорофилла, что ведет к общему снижению фотосинтетической активности у растений.

С нарушениями клеточных структур связан также часто наблюдаемый дефицит важнейших веществ, обеспечивающих энергетические потребности клеток и ряд других процессов, нормальное протекание которых контролируется проницаемостью клеточных мембран.

#### Воздействие загрязнителей на белково-ферментную систему клеток

Под влиянием токсических веществ происходит подавление энергообеспеченности клеток, приводящее к множественным последствиям, среди которых можно отметить основные:

- потеря растениями хлорофилла, что приводит к появлению хлороза на зеленых листьях;
- подавление активности микросомальных ферментов, вследствие чего наблюдаются многие патологические явления, в том числе приводящие к подавлению процессов биотрансформации, в результате не происходит детоксикация чужеродных веществ, поступающих в организм;
- снижение синтеза АТФ и другие последствия.

### **БИОТРАНСФОРМАЦИЯ И БИОДЕГРАДАЦИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ**

Можно выделить четыре типа биохимических реакций, приводящих к распаду и выведению токсических веществ из растительных и животных организмов:

**1**

процессы окисления;

**2**

процессы восстановления;

**3**

деградация загрязняющих веществ, приводящая к расщеплению их молекул;

**конъюгация — процесс соединения токсиканта с органическими молекулами клеток.**

При биотрансформации загрязняющих веществ в организмах ЖИВОТНЫХ имеют место все перечисленные процессы. Отметим, что в ходе эволюции животные организмы не сталкивались с высокими содержаниями токсических веществ в окружающей среде. В ряде случаев техногенные загрязнители представляют собой соединения, которые вообще на земле отсутствовали. Это, например, поверхностно-активные вещества, пестициды и др. В этих условиях биота оказалась эволюционно беззащитной. Живые организмы могут реагировать на поступление таких токсических веществ только «традиционными», эволюционно закрепленными биохимическими реакциями (окислительными, восстановительными и др.). Это приводит к тому, что в результате процессов детоксикации в организмах образуются остатки распадающихся токсических веществ (мебаболитов), которые часто обладают более высокими токсическими свойствами, чем исходное загрязняющее вещество, поступающее в организмы. Иными словами, биохимическая перестройка некоторых загрязняющих веществ по стандартному пути в животных организмах часто ведет не к обезвреживанию, а наоборот, к увеличению токсичности. Эти процессы называют **ТОКСИФИКАЦИЕЙ**.

Таким образом, судьба техногенных загрязняющих веществ в организмах животных может быть различной:

- расщепление и последующая утилизация фрагментов молекул загрязнителя и их выведение из организма;
- преобразование загрязнителей в водорастворимую форму и последующее выведение;
- преобразование в более токсические вещества (токсификация);
- связывание загрязнителей органическими структурами клеток и длительное захоронение в организме.

**В РАСТИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗМАХ** процессы деградации загрязняющих веществ путем образования водорастворимых фракций выражены слабо. Преимущественно происходят процессы связывания токсических веществ клеточными структурами стенок. При этом часто не происходит расщепления молекул загрязнителя. Последнее обстоятельство особенно важно, поскольку при потреблении растительной пищи загрязняющие вещества в неизменном виде поступают к животным-фитефагам.

Важнейшее значение в биотрансформации токсических веществ в окружающей среде имеют биокосные системы биоценозов, такие, как почвы и донные отложения водоемов. Процессы деградации здесь происходят главным образом за счет жизнедеятельности почвенных организмов. Особенno интенсивны эти процессы, если токсическому действию не подвержены почвенные организмы. Эффективность детоксикации загрязняющих веществ в почвах зависит от многих параметров, таких, как механические свойства почв, содержание в них гумуса, их аэрации и кислотности.

Отметим еще загрязнение природной среды внекромосомным (экстрахромосомным) клеточным материалом. Речь идет о широком распространении ПЛАЗМИД (небольшие кольцевые молекулы ДНК в бактериях) и ряда вирусов, содержащих ген устойчивости к различным антибиотикам. Если в 1952 г. частота выделенных штаммов дизентерийных бактерий, устойчивых к антибиотикам, была не более 0,05 % от общего числа изученных штаммов, то в 1972 г. их было уже 90 %.

Огромное распространение плаэмид вызвано широким использованием антибиотиков с лечебными целями, а также в качестве добавок к кормам сельскохозяйственных животных. Вместе с продуктами питания антибиотики поступают к человеку, это создает условия для преимущественного размножения бактерий, резистентных к данному антибиотику.

Часто трудно разделить токсические эффекты, возникающие на молекулярно-генетическом уровне, от реакции клеточно-тканевого уровня. Важным здесь является то, что в клетках

и тканях происходят пространственное разделение, разграничение и упорядочение процессов жизнедеятельности, благодаря разделению функций между специфическими клеточными структурами. С этим связано и пространственное разделение токсических факторов (например, в силу различия химических свойств загрязнителей), поражению могут быть подвержены различные ткани и органы: при интоксикации свинцом поражаются системы костного мозга и крови, при поступлении ртути или кадмия — почки.

Рассмотренные выше эффекты молекулярно-генетического и клеточно-тканевого уровней отражают лишь первичные механизмы токсического действия. В процессе реализации этих проявлений на последующих уровнях организации биологических систем происходит естественная элиминация структур, являющихся носителями рассмотренных факторов. Поэтому далеко не все молекулярно-генетические и клеточные дефекты могут проявиться на уровне отдельных популяций или биоценозов. Решающим здесь является частота проявления таких элементарных токсических актов и связанная с этим вероятность реализации поражения на уровне отдельного организма и популяции.

## 2. 2. Онтогенетический (организменный) уровень

Особью можно считать организм, происходящий из одной зиготы или гаметы и индивидуально подлежащий действию элементарных эволюционных факторов. Процесс онтогенеза — это развитие особи от зародышевой клетки до гибели в процессе реализации генетической информации, закодированной в структурах зародышевой клетки.

На онтогенетическом уровне осуществляется реализация генетической информации, завершающаяся становлением definitивной организации. При этом токсические эффекты проявляются как структурные (микро- и макроморфологические), так и функциональные (физиологические, биохимические, биофизические показатели). Эта реализация в процессе онтоге-

неза наследственной информации происходит на фоне постоянно изменяющейся внешней среды. Эволюционно сложилось так, что разбитие особи происходит нормально только в некотором диапазоне изменений внешних условий, как физико-химических, так и биологических. Этот диапазон называют диапазоном толерантности особи.

Вторжение человека в биосферу, в том числе ее загрязнение, привело к появлению новых необычных факторов среды, как правило, неблагоприятных. Среди токсических проявлений на онтогенетическом уровне следует отметить изменения в ЭМБРИОГЕНЕЗЕ. Очень многие токсические вещества способны вызывать нарушения эмбриогенеза. Эти вещества — тератогены (от греческого слова «терас» — чудоище). Например, при инкубировании икры форели в присутствии бенз-а-пирена в концентрациях, сходных с таковыми для загрязненных рек США, наблюдали возрастание числа морфологических аномалий у личинок (деформация позвоночника, отсутствие глаз, аномалии развития и т. д.). Аналогичным образом отмечено появление в колониях крачек Северной Америки уродливых птенцов как следствие повышенных концентраций полихлорбифенилов (ПХБ) и пестицидов в рыбе. В опытах на обезьянах показано, что повышенное содержание ПХБ в пище приводит к нарушению течения беременности, резорбции плода, выкидышам, повышенной эмбриональной смертности и т. д.).

По данным Всемирной организации здравоохранения, врожденные аномалии у человека почти на 6 % обусловлены факторами внешней среды, в том числе ее загрязнением.

Другим последствием техногенного загрязнения среды является нарушение развития в процессе РОСТА ОРГАНИЗМА. Имеются многочисленные данные о тормозящем влиянии загрязняющих веществ на рост и развитие организмов. Отмечено появление карликовых форм организмов, особенно среди растений. Так, значительные количества карликовых и уродливых форм (наросты, «ведьмины метлы» и др.) отмечены у растений на территории вблизи Чернобыля.

**Наиболее часто у растений отмечаются следующие токсические проявления:**

- хлороз (бледная окраска листьев, желтые или бурые края листа);
- некроз (отмирание отдельных участков листа), краевые или межжилковые некрозы;
- опадение листьев или хвои (дефолиация);
- снижение прироста или продуктивности, особенно радиального прироста у деревьев.

Перечисленные морфологические проявления токсичности могут быть использованы для диагностики состояния растительных сообществ в условиях загрязнения среды. Однако необходимо учитывать, что аналогичные проявления (некрозы, хлорозы, дефолиация и др.) могут быть вызваны и другим факторами, прямо не связанными с загрязнением. Например, климатические или погодные влияния, вредители, изменение водного режима.

По аналогии с растениями у животных организмов различные неблагоприятные факторы окружающей среды также могут быть причиной изменения анатомо-морфологических структур. Существуют три различные формы реакции организмов на загрязнение окружающей среды:

- изменение размеров тела, а также отдельных его частей (длина, пропорции тела, масса тела);
- изменение микроструктуры поверхности тела или его отдельных областей;
- изменение окраски тела или его отдельных частей.

Вместе с тем животные организмы обладают рядом своеобразных ответных реакций на загрязнение среды обитания:

- влияние на поведение животных, реализуемое через пространственное или временное избегание наиболее загрязненных участков;
- изменение свойств двигательной активности (функционально ориентированных), приводя-

- щих к неадекватной реакции на внешние факторы, в том числе реакции на хищника;
- нарушение биоритмоз.

Многообразный спектр реакций на загрязнение природной среды со стороны отдельного организма рассматривается в экологической токсикологии в качестве первичных механизмов токсичности, приводящих к эффектам популяционного и биоценотического уровней.

## 2. 3. Популяционно-видовой уровень

Под популяцией мы понимаем совокупность особей одного вида, в течение большого числа поколений населяющих определенное пространство, внутри которой осуществляется та или иная степень панмиксии и которая отделена от соседних таких же совокупностей особей той или иной степенью изоляции. На популяционно-видовом уровне изменения, возникающие на первых уровнях, приводят к эволюционным преобразованиям (микроэволюция) за счет выработки новой адаптивной нормы и связанного с ней процесса видеообразования.

Популяционный уровень — определяющий в экологической токсикологии, поскольку популяция является основной формой существования вида.

В РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОПУЛЯЦИЯХ отмечают следующие показатели токсического влияния загрязнителей окружающей среды:

- снижение продуктивности популяций, выраженное в общем снижении биомассы. Например, уменьшение прироста древесины, определяемое по годовым кольцам, или общее снижение численности деревьев;
- снижение плотности популяции (число экземпляров на единицу площади);
- сокращение площади, занимаемой популя-

цией, которая отступает с участков с максимальным загрязнением;

- переход к вегетативному пути размножения, когда снижается плодоношение. Так, у лишайников в условиях загрязнения атмосферы сернистым газом не образуются плодовые тела, происходит вегетативное размножение;
- изменение возрастной структуры популяции, зависящее от воздействия загрязнителей на всхожесть, продуктивность, длительность отдельных возрастных классов растений. В результате часто происходит «комоложение» популяции (увеличение доли младших возрастных классов). У деревьев с большой продолжительностью жизни отмечают обратный эффект — старение популяции за счет повышенной доли старших возрастных классов.

В ПОПУЛЯЦИЯХ ЖИВОТНЫХ отмечены аналогичные изменения (сокращение ореала обитания, общей биомассы, изменение возрастной структуры и т. д.). Вместе с тем решающее значение для судьбы популяции имеют нарушения процессов полового созревания и размножения.

Показано, что в результате накопления пестицидов в организмах лягушек наблюдается асинхронность в развитии голов и у самцов и самок, что исключает возможность успешного размножения.

Отмечено ухудшение качества спермы (нарушение подвижности сперматозоидов, возрастание числа патологических форм) у человека как следствие повышения концентраций ПХБ или тяжелых металлов.

Наличие даже следов нефти в пище водоплавающих птиц приводит к задержке у них начала кладки яиц, снижению их количества, понижается вылупляемость птенцов.

Даже шумовое воздействие (шумы метрополитена, записанные на пленку) способно значительно уменьшить способность лабораторных крыс к оплодотворению.

Большое значение для судьбы популяции животных имеют процессы биологического концентрирования токсических элементов животными высших трофических уровней. Широко известны случаи массовой гибели птиц и млекопитающих, особенно хищных, вызванные применением пестицидов. Соединения этого типа, а также органические соединения некоторых тяжелых металлов (особенно метил- и диметилртуть) способны активно переходить через стенки желудочно-кишечного тракта (до 90 %) и концентрироваться в тканях животных. Так же легко эти соединения проходят через гемато-энцефалический барьер, обусловливая высокие уровни токсикантов в мозгу животных. В этом случае чем выше положение животного в трофической цепочке, тем более высокие уровни токсических веществ накапливаются в его организме и тем более высокий токсический эффект следует ожидать.

Хотя влияние техногенного загрязнения испытывают все предшествующие уровни биологической интеграции, решающей точкой приложения внешних экотоксикологических воздействий оказывается прежде всего популяция организмов. Именно здесь реализуются те экотоксикологические эффекты, которые определяют функционирование последующих уровней (биоценотических и биосферного).

## 2. 4. Биоценотический (экосистемный) уровень

Биогеоценоз (БГЦ) — это участок земной поверхности, занимаемый совокупностью растений, животных, грибов и микроорганизмов, связанных между собой и образующих жизненное сообщество. Комплекс живых, косных и биокосных компонент, образующих БГЦ, связан воедино обменом вещества и энергии и отделен от соседних таких же комплексов какой-либо существенной границей.

БГЦ — элементарная часть биосферы — энергетически не замкнут. Обмен веществ и антропогенных загрязнителей между соседними БГЦ происходит в газообразной, твердой и жидкой фазах, а также в форме переноса живого вещества.

На биоценотическом уровне протекают вещественно-энергетические круговороты, вызванные жизнедеятельностью организмов и образующие в сумме большой биосферный круговорот, в который вовлекаются и токсические элементы.

Академиком С. С. Шварцем дано определение «хорошего» биоценоза, который должен отвечать следующим основным требованиям:

- продукция (биомасса) на всех трофических уровнях должна быть высокой, превышение фитомассы над зоомассой не должно быть резко выражено;
- высокой продукции должна соответствовать высокая продуктивность. Это необходимо для быстрой компенсации возможных потерь биомассы на отдельных трофических уровнях в результате внешнего воздействия, так как высокая продуктивность сама по себе не гарантирует достаточную компенсацию активности биологических систем;
- разнородность трофических уровней и структура экосистемы в целом должны способствовать высокой стабильности экосистемы в широком диапазоне внешних условий. Динамическое равновесие экосистемы должно обеспечивать состояние гомеостаза его биотической составляющей, в том числе и гидрологического режима территории и газового состава атмосферы;
- скорость биологической самоочистки экосистемы должна быть максимальной за счет большой скорости обмена вещества и энергии (обеспечение биологического круговорота в течение немногих годовых циклов);
- высокая резервная активность (способность к быстрой перестройке структуры сообщества) должна дополнять высокую степень продуктивности и стабильности экологической системы,

что поддерживает ее в оптимальном состоянии при изменении условий среды.

Таким образом, если биоценоз способен в измененной человеком среде поддерживать себя как систему в оптимальном состоянии, то это означает, что степень антропогенного воздействия не превышает возможностей биологической системы, не подрывает ее способности к гомеостазу.

Самым первичным показателем токсического действия антропогенного загрязнения является изменение первичной ПРОДУКТИВНОСТИ БИОЦЕНОЗА — общего количества органического вещества, производимого сообществом фотосинтезирующих продуцентов на единицу площади в единицу времени. Известно, что максимальная продуктивность характерна для тропических лесов и некоторых болотистых (высокоувлажненных) экосистем (до 3 500 г/м<sup>2</sup> за год). Наименее продуктивны экосистемы аридной зоны.

Под воздействием антропогенного загрязнения обычно снижается первичная продуктивность БГЦ. Так, при концентрациях ДДТ в водоеме 10<sup>-8</sup> г/г сокращается интенсивность фотосинтеза на 20 — 50 %, при концентрации того же пестицида в 10<sup>-7</sup> г/г отмечено снижение на 80 %.

Имеются и другие примеры снижения продуктивности под влиянием загрязнения.

Наиболее универсальным ответом БГЦ на техногенное загрязнение, часто используемым для оценки его состояния, является изменение СТРУКТУРЫ БИОЦЕНОЗА. При этом общей закономерностью является то, что выживающие виды, как правило, имеют более мелкие размеры тела и меньшую продолжительность жизни. Часто выпадение каких-либо видов ведет к усиленному развитию других видов, изменяется ранговое распределение.

Для того чтобы оценить степень деградации БГЦ под воздействием техногенного загрязнения, используют ряд критерий сходства или индексов разнообразия. При этом сравниваются контрольный и деградированный участки или изменение структуры ценоза во времени.

Большинство таких показателей оперирует понятием обилия вида ( $U_i$ ), под которым понимается группа количественных показателей или балльных оценок роли вида в биоценозе. В качестве показателей обилия этого вида могут быть использованы данные по числу особей на единицу площади, биомасса вида, площади покрытия (для фитоценоза), некоторые условные оценки обилия в баллах и т. д.

Можно рекомендовать следующие показатели сходства:

#### индекс Шеннона

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{U_i}{S \log_2 \left( \frac{U_i}{S} \right)},$$

где  $U_i$  — обилие вида  $i$ ;  $N$  — общее число видов в ценозе.

$$S = \sum_{i=1}^N U_i.$$

#### коэффициент общиности Соренсена-Смилта

(Этот коэффициент используется при необходимости сравнения ценозов в течение нескольких лет наблюдения.)

$$X_0 = \frac{2a}{2a + b + c},$$

где  $a$  — виды, присутствующие в ценозе в год наблюдения и в год, взятый для сравнения;  $b$  — виды, присутствующие только в год наблюдения;  $c$  — виды, присутствующие только в год, взятый для сравнения.

#### индекс разнообразия Симсона

(Этот индекс оценивает не только число видов, но и их представительство в ценозе.)

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i^2},$$

где  $P$  — доля каждого вида в ценозе.

Рассмотрим в качестве примера три сообщества, которые характеризуются следующими видами и их обилием:

**Сообщество 1**

**P<sub>1</sub> = 0.143**  
**P<sub>2</sub> = 0.143**  
**P<sub>3</sub> = 0.143**  
**P<sub>4</sub> = 0.143**  
**P<sub>5</sub> = 0.143**  
**P<sub>6</sub> = 0.143**  
**P<sub>7</sub> = 0.143**

---


$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= 7 \\ \mathbf{D} &= 6.97 \end{aligned}$$

**Сообщество 2**

**P<sub>1</sub> = 0.40**  
**P<sub>2</sub> = 0.20**  
**P<sub>3</sub> = 0.15**  
**P<sub>4</sub> = 0.10**  
**P<sub>5</sub> = 0.05**  
**P<sub>6</sub> = 0.05**  
**P<sub>7</sub> = 0.05**

---


$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= 7 \\ \mathbf{D} &= 4.17 \end{aligned}$$

**Сообщество 3**

**P<sub>1</sub> = 0.10**  
**P<sub>2</sub> = 0.10**  
**P<sub>3</sub> = 0.10**  
**P<sub>4</sub> = 0.10**  
**P<sub>5</sub> = 0.10**  
**P<sub>6</sub> = 0.10**  
**P<sub>7</sub> = 0.10**  
**P<sub>8</sub> = 0.10**  
**P<sub>9</sub> = 0.10**  
**P<sub>10</sub> = 0.10**

---


$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= 10 \\ \mathbf{D} &= 10.01 \end{aligned}$$

Таким образом, индекс разнообразия тем выше, чем большее число видов представлено в ценозе (сравнить сообщества 1 и 3) и чем равномернее распределение их обилия (сравнить сообщества 1 и 2).

Возможно употребление и других показателей сравнения, приводимых в литературе. В любом случае, используя такие индексы, мы можем количественно оценить меру изменения ценоза под влиянием антропогенного пресса. Вместе с тем необходимо помнить, что упрощение ценозов (уменьшение числа видов), их омоложение (изменение возрастной структуры), происходящее в процессе индустриализации и урбанизации, изменение отдельных звеньев цепи питания, увеличение роли животных как деструкторов первичного органического вещества и другие изменения — все это не всегда является признаком деградации биогеоценоза. Эти изменения могут рассматриваться как показатели эволюционного преобразования ценоза в новых условиях.

### **3. ВОЗМОЖНА ЛИ АДАПТАЦИЯ БИОТЫ К ТЕХНОГЕННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

В многочисленных дискуссиях о судьбе природных популяций в условиях техногенного воздействия часто звучат аргументы, связанные с возможной адаптацией биологических систем к действию токсического фактора. Действительно, в медицинской токсикологии явление адаптации — процесса приспособления животных организмов к неблагоприятному влиянию внешней среды — широко обсуждается и учитывается при оценке допустимых уровней воздействия. В экологической токсикологии, изучающей функционирование систем надорганизменного ранга, можно говорить о двух уровнях адаптации:

- приспособительные реакции в организмах, выраженные в разнообразной коррекции определенных биохимических, физиологических и иных процессов, обеспечивающих их нормальное функционирование. Наличие подобных реакций у животных широко подтверждается многочисленными данными медицинской токсикологии и не вызывает сомнения;
- приспособительные реакции надорганизменного характера, типичные для природных систем, подверженных длительному влиянию неблагоприятных факторов. Под термином «адаптация» в этом случае подразумевается поддержание популяцией некоторого нормального уровня ее функционирования (за счет толерантных особей, их фертильности, плодовитости и т. д.), а также наличие генетической изменчивости, достаточной для того, чтобы посредством естественного отбора адаптироваться в условиях окружающей среды. Предполагается, что значения частот и амплитуд всех этих изменений не выходят за рамки определенных границ.

Одним из важнейших проявлений адаптационных явлений в растительных популяциях является направленное изменение их эколого-генетической структуры, позволяющее растительным сообществам выполнять свои биогеоценотические функции в измененных условиях среды обитания. Такое

**изменение структуры возникает в результате взаимодействия токсического фактора и исходного полиморфизма природных популяций.**

В качестве примера приведем данные американских авторов, изучавших луговые сообщества полевицы, расположенные вблизи медеплавильного завода. В качестве меры устойчивости растений к токсическому фактору был использован так называемый тест корневых систем. Индекс толерантности растений определяли как отношение средней длины корней растений, культивируемых в питательных растворах с добавлением определенных количеств меди, к такому же показателю у растений, произрастающих в аналогичных растворах без меди. Авторы изучали растения, отобранные на лугах различного возраста. Почвы около завода были загрязнены настолько, что молодая трава, посаженная пятью годами ранее, не покрывала полностью поверхность земли. В то же время старые луга возрастом до семидесяти лет имели хорошо развитый покров с большим преобладанием полевицы над другими видами. Установлено, что растения полевицы из незагрязненных мест были полностью нетолерантны к меди. Показано, что с течением времени неуклонно возрастает доля растений, обладающих повышенным индексом толерантности к меди. Если на незагрязненных участках растения с индексом толерантности большим 25 % полностью отсутствуют, то по мере старения луга все большая часть растений обладает повышенной устойчивостью и к семидесяти годам более половины растений характеризуется индексом толерантности большим 50 %.

Исследованиями ленинградских ученых показано, что даже незначительное постоянное увеличение уровня тяжелых металлов в почвах может вызвать внутривидовую дифференциацию ряда дикорастущих видов растений. Ими отмечена вызванная этой дифференциацией повышенная устойчивость к свинцу, цинку, меди популяций некоторых южно-уральских видов в районе медно-колчеданногоrudопоявления. В литературе имеются данные о реакции на загрязнение окружающей среды популяций животных. Американские ученые показали,

что многоноожки, отловленные на местах с повышенным содержанием цинка, кадмия, свинца, меди, показывают большую устойчивость к действию токсических факторов, чем животные с чистых участков, если тех и других содержать на рационах с повышенным количеством перечисленных металлов. Несмотря на возможность индивидуальной адаптации животных к повышенному поступлению токсикантов, приводимые данные подобно данным для растительных сообществ, приведенным выше, скорее всего отражают эффект адаптированности популяционного уровня. В силу исходной разнокачественности природных популяций происходит своеобразное «обогащение» популяции толерантными особями. Именно поэтому при экспериментальном содержании животных на рационах с высокими уровнями токсических элементов эта группа многоноожек характеризуется повышенной выживаемостью по сравнению с контрольной.

Является ли многообразие форм (в нашем случае, например, спектр толерантности у растений на загрязненных участках) благом для популяции? Однозначного ответа, видимо, не существует. Действительно, с одной стороны, если рассматривать техногенный фактор в качестве постоянно действующего, то проявление в популяции широкого набора форм, в различной мере приспособленных к его влиянию, обеспечивает популяции большую устойчивость. В случае с полевицей появление со временем на загрязненных участках хорошо развитого растительного покрова подтверждает этот вывод.

С другой стороны, увеличение популяционной устойчивости по отношению к токсическому фактору, видимо, сопровождается потерей свойств, повышающих ее приспособленность в обычных природных условиях. Ведь не случайно популяция на чистых участках состоит из иных форм растений по сравнению с загрязненными. Проблема популяционной адаптации — сложнейшая в экологической токсикологии. Ее решение базируется на фундаментальных закономерностях популяционной генетики. Сегодня мы располагаем лишь немногочисленными проявлениями таких адаптационных явлений популяционного ранга.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Своебразие современного состояния экологической токсикологии заключается, с одной стороны, в необходимости скорейшего внедрения в практику природопользования экологически обоснованных регламентов антропогенных нагрузок, с другой — в отсутствии необходимого для этого теоретического базиса и методологии нормирования.

При всей ценности опыта организации санитарно-гигиенического нормирования нельзя, по-видимому, ожидать что когда-нибудь будет предложена единая система экологических нормативов. Уникальность каждого природного объекта, подлежащего защите от действия токсического фактора, вместе с экологическим разнообразием и спецификой природно-климатических и географических зон требует определения индивидуальных нормативов, приуроченных к определенному виду антропогенного загрязнения и для конкретной природной ситуации. Подобный «штучный» характер экологических норм требует создания постоянно действующей системы выработки экологических нормативов.

Трудности становления экотоксикологии в качестве самостоятельного направления связаны сегодня с отсутствием достаточно строгой теоретической основы, объединяющей накапливаемый полевой и экспериментальный материал и объясняющий его.

Неоднозначность исходных данных, получаемых в различных природных условиях и при различных воздействиях, отсутствие объяснимой связи между натурными наблюдениями и экспериментом, часто оторванность теоретических положений от конкретного их приложения к решению практических задач — все это признаки новизны научного направления.

Трудности эти объективны и связаны прежде всего с тем, что биологические системы надорганизменного ранга представляют собой сообщество разнообразных компонентов от почвенных микробных сообществ до популяций крупных животных и высших растений. Естественно, что описание реакции такой

сложной системы на антропогенное загрязнение, выраженное в форме аналога зависимости «доза — эффект», требует достаточных знаний о функционировании таких систем.

Сегодня биогеоценология не располагает строгой обобщающей теорией функционирования природных экосистем для условий, когда параметры среды не выходят за рамки многолетних фоновых значений.

Это обстоятельство серьезно, так как встает вопрос: можно ли говорить о теории и практической реализации основных положений экологической токсикологии, если мы не располагаем достаточными сведениями о функционировании «в норме» большого количества компонентов и биоценоза в целом?

На этот вопрос проще всего ответить отрицательно. Однако сегодняшняя ситуация с сохранностью природных систем и острая необходимость введения научно обоснованных регламентов антропогенного загрязнения требует его незамедлительного разрешения.

В этой связи сошлемся на Декларацию конференции ООН по охране окружающей среды (Бразилия, 1992), в которой отмечается: « С целью защиты окружающей среды государства в соответствии с имеющимися у них возможностями должны принимать широкие меры предосторожности. В случае существования опасности серьезного или непоправимого ущерба недостаток научной информации не должен служить причиной для отсрочки эффективных мер по предотвращению разрушения окружающей среды»\*.

---

\* Цит. по.: КОПТЮГ В. А. Конференция ООН по охране окружающей среды и развитию. Новосибирск, 1992.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ОДУМ Ю. Экология. М., 1986. 376 с.
- РАМАД Ф. Основы прикладной экологии. Л., 1981. 544 с.
- БИГОН М., ХАРПЕР ДЖ., ТАУСЕНД К. Экология. Особи, популяции и сообщества. М., 1989. 478 с.
- БИОИНДИКАЦИЯ загрязнений наземных экосистем: Пер. с нем. / Под ред. Р. Шуберта. М., 1987. 348 с.
- КАБАТА-ПЕНДИАС А., ПЕНДИАС Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. / Под ред. Ю. Е. Састи. М., 1989. 440 с.
- АЛЕКСЕЕВ Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л., 1989. 142 с.
- БЕЗЕЛЬ В. С. Популяционная экотоксикология млекопитающих. М., 1987. 128 с.

### *Приложение 1*

## ВЕЩЕСТВА, ОБЛАДАЮЩИЕ РАДИОЗАЩИТНЫМ ДЕЙСТВИЕМ И СПОСОБНОСТЬЮ СВЯЗЫВАТЬ И ВЫВОДИТЬ РАДИОНУКЛИДЫ\*

Некоторые пищевые вещества обладают профилактическим действием или способностью связывать и выводить из организма радионуклиды. К ним относятся полисахариды (пектин, декстроза), фенольные и фитиновые соединения, галлаты, серогонин, этиловый спирт, некоторые жирные кислоты, микроэлементы, витамины, ферменты, гормоны. Радиостойчивость организма повышают некоторые антибиотики.

\* См.: Как очистить организм от радиации / Центр «КРиМ и К»; Сост. В. Л. Леонидов, А. М. Матвеев. Екатеринбург, 1993. 35 с.

## **ПЕКТИНОВЫЕ ВЕЩЕСТВА**

**(ПРОПЕКТИН, ПЕКТИН, ПЕКТИНОВАЯ КИСЛОТА)**

ПЕКТИН — студенистое вещество, которое хорошо заметно в варенье или желе, приготовленных из фруктов. Иногда пектинов бывает так много, что отжатый сок, например из крупноплодных боярышников, без всякого уваривания быстро превращается в плотный студень. В процессе усвоения пищи пектин превращается в полигалактуроновую кислоту, которая соединяется с радионуклидами и токсическими тяжелыми металлами. Образуются нерастворимые соли, не всасывающиеся через слизистую желудочно-кишечного тракта и выделяющиеся из организма.

ПЕКТИНОСОДЕРЖАЩИЕ ВЕЩЕСТВА обладают высокой способностью в течение одного — трех часов связывать стронций, цезий, цирконий, иттрий, ионы свинца и ряд других катионов и эвакуировать из организма до половины этих элементов. По данным НИИ микробиологии и вирусологии АН Украины, суточный рацион продуктов должен содержать пектин для профилактического питания в течение двух недель — 6 — 8 г, для лечебного (три недели) — 15 — 16 г.

Пектин содержит различные овощи, фрукты, лекарственные растения. В 100 г свежих плодов содержится пектиновых веществ: в шиповнике — 1,8 — 3,7 г, в крупноплодной клюкве — 1,47 — 2,31 г, в боярышнике — 0,8 — 3,68 г, в черноплодной рябине — 0,5 — 1,9 г, в землянике — 0,6 — 1,4 г, в жимолости, абрикосах, вишне — по 1,0 г, в яблоках — 0,75 — 1,7 г. Лечебно-профилактическое значение имеют и кисели, напитки, соки из овощей и фруктов, содержащих пектин.

## **ВИТАМИНЫ**

К очень важным радиозащитным соединениям относятся так называемые витамины противодействия. В первую очередь это витамины группы В и С.

По данным латвийских ученых, при прочих равных условиях ВИТАМИН С в дозе 300 мг в день способствует лучшему сохранению веса тела облучаемых больных. ВИТАМИН В1 (суточная норма 2 — 3 мг) содержится в зернах пшеницы, кашах

(овсяной, гречневой, пшеничной), фасоли, горохе, цветной капусте, спарже. ВИТАМИН В3 (суточная норма 10 — 15 мг) содержится в орехах, бананах, сухой фасоли. ВИТАМИН В12 (суточная норма 0,0025 — 0,005 мг) — в морской капусте, рыбе, крабах, печени, молоке. ВИТАМИН В6 (суточная норма 2 — 3 мг) — в пшенице, картофеле, бобовых, кукурузе, крапиве. Много ВИТАМИНА Р в черноплодной рябине, шиповнике, облепихе, черной смородине, винограде, зелени петрушки, салате, чае.

### **ФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ**

Ученые определяют эти соединения как наиболее перспективные источники потенциально активных противовирусных средств. Фенольные соединения — это биологически активные вещества лечебно-профилактического действия, они повышают прочность кровеносных сосудов, регулируют работу желез внутренней секреции.

Из многочисленного ряда фенольных соединений наибольший интерес вызывают флавоноиды, способствующие удалению радионуклидов из организма. Источниками флавоноидов являются мандарины, черноглодная рябина, облепиха, боярышник, пустырник, различные виды горцев, бессмертник, солодка.

### **МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТЫ**

С точки зрения радиационной гигиены полезно потреблять продукты, богатые кальцием, препятствующие усвоению стронция-90 и способствующие его выведению из организма. Много кальция в молочных продуктах, миндале, шпинате, зеленом луке, горошке, фасоли, капусте. При употреблении пищи с повышенным содержанием кальция за 12 дней увеличивается выведение стронция до 10 %.

Благоприятное воздействие на организм оказывает кобальт, который стимулирует процессы кроветворения, увеличивает синтез нукleinовых кислот, помогает общей регенерации организма после тяжелых заболеваний. Больше всего кобальта в пшенице и гречихе (до 0,35 мг/кг), зернах какао (0,3 мг/кг), чае и кукурузе (0,15 мг/кг).

## **СЕРОТОНИН**

Соединение обладает значительным радиозащитным действием. В растениях встречается достаточно редко. Обнаружен в плодах облепихи, крыжовнике, ананасах, барбарисе, бананах.

## **СЕРОСОДЕРЖАЩИЕ ВЕЩЕСТВА (МЕТИОНИН, ЦИСТИН, ГЛЮТАМИОН)**

Серосодержащие соединения способствуют нейтрализации активных радикалов, образующихся при облучении организма радиоактивным излучением. Сера поступает в организм при употреблении бобовых, гречневой крупы, чеснока, крыжовника, лука, капусты, земляники, редиса. Суточная потребность человека составляет 4 — 5 г.

К природным защитным веществам относятся ферроцин, бетакаротин, альгинат кальция, сукцинат натрия, которые содержатся в морской капусте, моркови, чае и некоторых других растениях.

## **ВЕЩЕСТВА, СПОСОБНЫЕ НЕЙТРАЛИЗОВАТЬ ТОКСИЧЕСКИЕ МЕТАЛЛЫ**

Для живых организмов являются токсическими тяжелые металлы, плотность которых превышает 6 г/см<sup>3</sup>. Наиболее вредные из них — кадмий, свинец, ртуть и мышьяк.

Подобно защите от действия радионуклидов пектиновые вещества используются также при защите от влияния токсических элементов. Эти соединения обволакивают слизистую оболочку кишечника и защищают ее от химических и механических раздражителей, связывают соли тяжелых металлов (свинца, мышьяка, ртути и др.) и выводят их из организма.

Тиоловые яды (свинец, ртуть, мышьяк) обезвреживаются белками животного происхождения, богатыми цистином, цистеином, метионином, т. е. серосодержащими аминокислотами.

При интоксикации тяжелыми металлами пища должна быть богата липотропными веществами (метионин, холин, лецитин, высоконасыщенные жирные кислоты), иметь повышенное количество витамина С (антитоксические свойства), солей магния (сосудорасширяющие действия, усиливающие желчеот-

деление). Ограничиваются количество животных жиров и повышается доля растительного масла, обладающего липотропным действием. Липотропные вещества содержатся также в овсяной и гречневой крупах, соевой муке, рыбе.

### **ФИТОТЕРАПИЯ ПРИ ОТРАВЛЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

**ВИШНЯ** (ягоды и плодоножки) применяется как противоядие при отравлении ртутью и свинцом. Отвар плодоножек: 1 столовая ложка на 1 стакан воды (кипятка), кипятить 10 минут. Принимать по полстакана 1 — 3 раза в день.

**ДУБ** (кора) используется при отравлении свинцом и медью. Отвар готовят так: 2 столовые ложки коры на 0,5 л кипятка, кипятить 20 минут, процедить. Принимать по полстакана 3 раза в день за полчаса до еды.

**ЛОПУХ.** Применяется как противоядие при отравлении ртутью. Отвар: 2 столовые ложки корня на 0,5 л кипятка, кипятить 20 минут, процедить. Принимать по полстакана 3 раза в день. Холодный настой: 3 столовые ложки измельченного корня на 250 мл холодной воды, настаивать 5 часов, процедить и использовать (суточная доза).

**ОВЕС.** Применяется как противоядие при отравлении свинцом. Используется крупа в питании без молока и отвар зерен. Отвар зерен: 2 стакана зерна на 1 л кипятка, кипятить 30 минут, процедить. Принимать по полстакана 3 раза в день.

**РЯБИНА ЧЕРНОПЛОДНАЯ.** Применяется при отравлении мышьяком. Ягоды принимаются по 100 г 3 раза в день. Сок из ягод принимают по 50 г 3 раза в день за 30 минут до еды. Настой: 4 столовые ложки ягод на 2 стакана кипятка, настаивают в течение 2 часов. Применяют по полстакана 3 — 4 раза в день за 30 минут до еды. Курс лечения — 10 — 30 дней.

**ХВОЩ ПОЛЕВОЙ.** Способствует выведению из организма свинца. Настой: 1 столовая ложка травы на 1 стакан кипятка, настаивают 2 часа, процеживают. Принимают по полстакана 2 — 3 раза в день через час после еды. Применяют по назначению врача, так как хвощ противопоказан при нефритах и нефрознеснефритах.

Среди других растений как противоядие при отравлениях используют также горец птичий, липу, одуванчик, полынь горькую и другие.

**ГОРЕЦ ПТИЧИЙ (СПОРЫШ).** Настой: 2 столовые ложки травы на 2 стакана кипятка, настаивают 2 часа, процеживают. Принимают по полстакана 3 раза в день. Отвар: 2 столовые ложки травы на 2 стакана кипятка, кипятить 5 минут, процеживают. Принимать по полстакана 3 раза в день перед едой.

**ЛИПА СЕРДЦЕВИДНАЯ.** Используют угольный порошок из древесины липы по 1 чайной ложке 3 раза в день.

**ПОЛЫНЬ ГОРЬКАЯ.** Настой: 2 столовые ложки травы на 1 стакан кипятка, настаивают 20 минут, процеживают. Принимать по четверти стакана 3 раза в день за 30 минут до еды. Спиртовая настойка: траву и 70-градусный спирт берут 1 : 5. Принимают по 15 — 20 капель 3 раза в день за 30 минут до еды.

#### *Приложение 2*

### **ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ И ФОНОВЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ТОКСИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ**

### **ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НЕКОТОРЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ, МКГ/М<sup>3</sup>**

Вещество	ПДК среднесуточные
Кадмий , окись	1,0
Кобальт металлический	1,0
Марганец и его соединения (в пересчете на MnO <sub>2</sub> )	10,0
Медь, окись	2,0
Мышьяк, неорганические соединения, кроме H <sub>3</sub> As в пересчете на As	1,0
Никель, растворимые формы	0,2
Ртуть металлическая	0,3
Свинец и его соединения в пересчете на Pb	0,3
Свинец сернистый	1,7

Вещество	ПДК среднесуточные
Фтор газообразный	5,0
Фториды, хорошо растворимые	10,0
Фториды, плохо растворимые	30,0
Хром шестивалентный в пересчете на CrO <sub>3</sub>	1,5
Цинк, окись	50,0

**ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВЕ, МГ/КГ**

Элемент	ПДК валового содержания (превышение над фоном)
Медь	+ 10,0
Никель	+ 20,0
Ртуть	+ 2,1
Свинец	+ 20,0
Хром	+ 0,05
Цинк	+ 50,0

**ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДЕ, МГ/Л**

Элемент	Хозяйственно-питьевое водопользование	Рыбохозяйственное водопользование
Железо	1,0	—
Кадмий	0,001	0,005
Кобальт	10,0	—
Медь	0,1	0,01
Мышьяк	0,05	0,05
Никель	0,1	0,01
Ртуть	0,0005	—
Свинец	0,03	—
Селен	0,001	—
Стронций	2,0	—
Фтор	1,5 — 3,0	—
Хром	0,1	—
Цинк	1,0	0,01

**ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ  
ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТАХ,  
МГ/КГ СУХОГО ВЕСА**

Элемент	Хлебные и зерно- вые продукты	Овощи	Фрукты
Алюминий	20,0	30,0	20,0
Железо	50,0	50,0	50,0
Кадмий	0,02	0,03	0,03
Мышьяк	0,2	0,2	0,2
Никель	0,5	0,5	0,5
Ртуть	0,01	0,02	0,01
Свинец	0,2	0,5	0,4
Сурьма	0,1	0,3	0,3
Селен	0,5	0,5	0,5
Фтор	2,5	2,5	2,5
Хром	0,2	0,2	0,1
Цинк	25,0	10,0	10,0

**Содержание**

<b>Введение. Что такое экологическая токсикология?</b>	<b>3</b>
<b>1. ПОПУЛЯЦИОННЫЙ ХАРАКТЕР ЗАВИСИМОСТИ «ДОЗА — ЭФФЕКТ»</b>	<b>10</b>
<b>2. ТОКСИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b>	<b>19</b>
2.1. Молекулярно-генетический и клеточный уровни токсических эффектов	19
2.2. Онтогенетический (организменный) уровень	24
2.3. Популяционно-видовой уровень	27
2.4. Биоценотический (экосистемный) уровень	29
3. ВОЗМОЖНА ЛИ АДАПТАЦИЯ БИОТЫ К ТЕХНОГЕННОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	34
Заключение	37
Список литературы	39
Приложение 1	39
Приложение 2	44