

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ
Зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.
_____ В.И. Туев
« ____ » _____ 2021 г.

Учебное пособие по дисциплине

Методы биоиндикации окружающей среды

для направлений «Экология и природопользование»,

Разработчик:
Профессор кафедры РЭТЭМ
_____ А. Г. Карташев
« _ » _____ 2021

Томск 2021

В учебном пособии рассмотрены современные научные и прикладные проблемы биоиндикации окружающей среды. Представлены методы биоиндикации экологического состояния природной среды при действии антропогенных факторов, экологических катастроф и землетрясений. В зависимости от уровня организации биосистем проведён анализ адаптивных реакций биосистем. Выявлены особенности адаптаций биосистем при нефтезагрязнениях. Пособие предназначено для студентов и преподавателей, занимающихся экологией и биоиндикацией экологического состояния природной среды.

Введение	4
Глава 1. Современные теоретические представления о биоиндикации	8
1.1. Адаптационные возможности биосистем	8
1.2. Микроорганизмы — биоиндикаторы окружающей среды	14
1.3. Биоиндикационные показатели органов и тканей	16
1.4. Организменный уровень биоиндикации	20
1.5. Нарушения в онтогенезе биосистем	28
1.6. Популяционно-видовой уровень биоиндикации	34
1.7. Биоценотический уровень биоиндикации	51
1.8. Ландшафтный уровень индикации	55
1.9. Этапы адаптации биосистем	58
Глава 2. Биоиндикация нефтезагрязнений	62
2.1. Дождевые черви — биоиндикаторы нефтезагрязнений	62
2.2. Почвенные нематоды — биоиндикаторы нефтезагрязнений и минерализованных растворов	77
2.3. Влияние бензина на сообщества нематод	81
2.4. Почвенные инфузории — биоиндикаторы нефтезагрязнений и нефтепродуктов	85
2.5. Влияние бензина на сообщества почвенных инфузорий	91
2.7. Раковинные амебы — биоиндикаторы нефтезагрязнений, нефтепродуктов и сеноманских растворов	93
2.8. Гидробионты — биоиндикаторы нефтяных загрязнений	102
2.9. Коловратки — биоиндикаторы нефтезагрязнений пресноводных водоемов	109
2.10. Донные организмы — биоиндикаторы нефтяных загрязнений	113
2.11. Моллюски — биоиндикаторы антропогенных загрязнений	121
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	129
Глава 3. Биоиндикация физических загрязнений	131
3.1. Тепловое загрязнение	131
3.2. Электромагнитные загрязнения	133
3.3. Радиоактивное загрязнение	139
Глава 4. Биопрогнозирование экологических катастроф	150
4.1. Биопрогнозирование землетрясений	150
4.2. Биопрогнозирование антропогенных кризисных ситуаций	165
<i>Контрольные вопросы</i>	176
Заключение	177
Библиографический список	179

Введение

Практически по любому виду загрязнений имеются наборы биотестов, позволяющих оценить степень нарушенности экосистем. В настоящем учебном пособии впервые представлены методы биоиндикации нефтезагрязний и нефтепродуктов почв и водных биоценозов. Водоемы способны накапливать, адсорбировать антропогенные загрязнения и служить долговременным источником токсического влияния на окружающую среду. Особенно опасны нефтезагрязнения для непроточных водоемов, так как они приводят к длительному загрязнению и деградации биоценозов. Необходимо расширить исследования по биоиндикации распространенных нефтепродуктов, таких как бензин, дизельное топливо, бытовые и строительные пластмассы.

Недостаточная современная разработка концепции биоиндикации экологических катастроф затрудняет прогнозирование природных катаклизмов и землетрясений. Необходимо подчеркнуть, что временной прогноз землетрясений в связи с недостаточной изученностью биопредвестников является самым слабым звеном исследований.

Прогнозирование техногенных экологических катастроф осуществляется при изучении уже случившихся антропогенных катаклизмов: разливов нефти, загрязнения бытовыми отходами и т. д. Последствия новых техногенных аварий прогнозируются неэффективно. Предложенная в середине XIX в. теория катастроф Кювье не получила системного развития. Современные исследования по биопрогнозированию естественных и антропогенных катастроф находятся на этапе сбора фактического материала и построения гипотез.

Тем не менее биотестирование и биопрогнозирование антропогенных загрязнений является активно развивающейся областью экологических исследований,

позволяющих адекватно прогнозировать, оценивать разрушение природной среды и разрабатывать оптимальные рекультивационные мероприятия.

Учебное пособие рекомендовано для студентов-бакалавров, обучающихся по специальности «Экология и рациональное природопользование», дисциплине «Биоиндикационные методы контроля окружающей среды».

Исследования по биоиндикации антропогенных загрязнений и экологических катастроф являются необходимым компонентом современных экологических знаний, поэтому в результате изучения материалов пособия студент должен:

знать

- закономерности, гипотезы и теории биоиндикационных методов контроля окружающей среды;
- базовые понятия экологического мониторинга, нормирования и снижения загрязнения окружающей среды, техногенных систем и экологического риска;

уметь

- анализировать особенности биоиндикационных методов;
 - проводить экологический анализ состояния среды с использованием биоиндикационных методов;
 - использовать теоретические знания на практике;
- владеть***
- конкретными методиками биоиндикации при экологических исследованиях;
 - методами обработки, анализа и синтеза полевой и лабораторной экологической информации.

Важно, чтобы студент реализовывал свои компетенции в плане глубокого понимания и творческого использования в научной деятельности знаний фундаментальных и прикладных разделов современной экологии, готовности решать глобальные и региональные экологические проблемы.

Глава 1. Современные теоретические представления о биоиндикации

1.1. Адаптационные возможности биосистем

Использование биологических изменений окружающей среды с целью оценки и прогноза ее состояния началось с первых шагов эволюции человека. Совокупность биоиндикационных представлений первобытного человека о поведении животных была основой успешной охоты. Биологические знания по экологии растений позволили нашим предкам отобрать будущие сельскохозяйственные культуры.

Можно сказать, что выживаемость первобытной человеческой популяции всецело зависела от «биоиндикационных» познаний. Знания накапливались, передавались в устной, культовой и письменной форме из поколения в поколение.

Развитие городов, технический прогресс, создание искусственной среды обитания человека изменили его взаимоотношения с природой, привели к использованию технических средств контроля состояния окружающей среды. Необходимость сопоставления показателей физико-химического состояния среды с их биологическим значением стимулировала биоиндикационные исследования. Успешное использование методов биоиндикации для экологической оценки состояния окружающей среды основывается на ряде эмпирических представлений.

Первое — устойчивость биосистем к любому повреждающему фактору может быть представлена в виде ряда биологических форм.

Второе — для всех биологических систем характерен принцип универсальности, следовательно, всегда возможен перенос наблюдаемых изменений с одного вида биосистем на другой.

Третье — эмоциональная убедительность, когда в середине лета желтеет трава, улетают птицы, происходит массовое размножение беспозвоночных, ухудшается настроение наблюдателя.

В современной биологии принята концепция об уровнях организации биосистем: начальный уровень организации биологических систем считается молекулярным, завершающий — биосферным. Под устойчивостью биосистем будем понимать их способность противостоять внешним изменениям среды в целях самосохранения.

Основываясь на таких общих представлениях, рассмотрим устойчивость биосистем в зависимости от уровня их организации.

Молекулярный уровень: вирусы, нуклеиновые кислоты, белки, аминокислоты характеризуются высоким уровнем устойчивости, сравнимым с неживой материей.

Клеточный уровень: микробы, одноклеточные, водоросли и т. д. характеризуются относительно высокой степенью устойчивости.

Органоидный и физиологический уровни биосистем обладают относительно низкой устойчивостью.

Начиная с организменного уровня устойчивость к влиянию внешних факторов становится активной. Организмы изменяют физиологическое состояние — вытесняют воду, образуют споры, избегают неблагоприятных факторов.

В развитии адаптационного комплекса на организменном уровне можно выделить индивидуальный тип адаптивных реакций, направленный на самосохранение, выживание, и видовой, связанный с сохранением вида и популяции.

К видовому типу адаптаций относятся физиологические системы и органы, ответственные за воспроизводство: мужская, женская половые системы и весь комплекс физиологических механизмов, ответственных за нормальное воспроизводство потомков. Наиболее

чувствительными к влиянию стрессоров являются гипоталамус — отдел головного мозга, ответственный за стрессовые механизмы физиологических реакций, кора надпочечных желез, щитовидная железа, система желудочно-кишечного тракта, система крови, система сперматогенеза и женская половая система.

Независимо от типа влияния естественного или антропогенного фактора при условии превышения его физиологического уровня в организме развивается общий адаптационный синдром, или стресс. Определение уровня стресса организма животных и человека можно проводить по хорошо известным биохимическим и морфологическим методикам состояния надпочечных желез. Углубление стрессовой ситуации приводит к развитию симптомов язвенной болезни и нарушениям в системе сперматогенеза и функционировании гонад¹.

Популяции, сообщества, экосистемы преобразуют среду в направлении повышения выживаемости биосистем. На уровне биосферы формируется гомеостаз биотической и абиотической среды, в которой возможны существование организмов и эволюция. Следовательно, от молекулярного до популяционного уровня организации живой материи устойчивость биосистем пассивная, она определяется их приспособляемостью к внешней среде.

Начиная с уровня популяций, сообществ характер биологических механизмов, обеспечивающих устойчивость, становится принципиально другим — активным, появляются системы круговорота веществ, энергии и информации, обеспечивающие стабильность биосферы. Образуются природоохранные экраны (озоновый, углекислый); обеспечивается цикличность климатических условий планеты. В условиях сформировавшейся биосферы «разменной монетой»

¹ *Карташев А. Г.* Адаптация животных к хроническим факторам. Изд-во Lap Lambert Academic Publishing, 2014.

стабильности экологической среды становится организм как наиболее неустойчивая и пластичная единица ее структурной организации.

Все биологические системы независимо от уровня организации существуют в изменяющейся окружающей среде. Для выживания и преобразования среды необходимы механизмы, позволяющие сохранять функциональную и структурную целостность живого в пределах изменчивости внешнего мира. Основная задача живого — выжить — осуществляется путем приспособления биосистем к среде, или адаптации. Адаптация по каждому фактору и по совокупности факторов характеризуется биохимическими, физиологическими, генетическими и экологическими пределами. Совокупность всех адаптационных характеристик организма, популяции, сообществ определяет их экологическую нишу, среду обитания, в которой возможно оптимальное развитие биосистем. Если уровень воздействующих на организм факторов превышает адаптационные возможности, то происходит деградация, разрушение части биосистемы или всей биосистемы.

В научной литературе довольно широко используется термин «стресс». Под стрессом в широком биологическом смысле подразумевается реакция биосистемы на экстремальные, предельные воздействия факторов среды. С биоиндикационной точки зрения наибольший интерес представляют выявление экстремальных стрессовых воздействий и прогноз возможного уровня деградации биосистем.

По мнению современных исследователей, существует шесть основных типов биоиндикационных реакций в зависимости от времени действия и вида фактора:

- А — биоиндикатор через определенное время отвечает одноразовой сильной реакцией при действии фактора и затем теряет чувствительность;

- Б — после определенного времени воздействия наблюдается сильная одноразовая реакция, которая продолжается какое-то время;
- В — биоиндикатор реагирует с момента появления воздействия с одинаковой интенсивностью в течение длительного времени;
- Г — после немедленной сильной реакции наблюдается ее затухание;
- Д — реакция на воздействие медленно нарастает, достигает своего максимума и затухает;
- Ж — колебательный характер ответных реакций.

В связи с тем, что все адаптивные реакции используют большое количество энергии при компенсации воздействующих факторов, можно установить несколько эмпирических правил адаптации.

Чем интенсивнее воздействующий фактор, тем больше энергетических ресурсов расходует биосистема на компенсацию.

Если фактор неизвестен биосистеме, то он не вызывает сигнальной, стимулирующей энергетику биосистемы реакции, поэтому встраивается в нее и ведет к разрушению биосистемы (мимикрирующий эффект). К таким факторам относятся синтезированные человеком химические вещества, электромагнитные и радиоактивные излучения. Адаптация биосистемы к экстремальным воздействиям вследствие больших ресурсных затрат нередко приводит к ее деградации — упрощению.

1.2. Микроорганизмы — биоиндикаторы окружающей среды

Теоретически, в зависимости от уровня организации биосистем меняются адаптационные возможности живых организмов. Для каждого уровня характерен специфический набор показателей, соответствующий выполняемым функциям. Особенности биохимического уровня организации, характерного для микроорганизмов, являются:

- сохранение структурной целостности макромолекул при их функционировании в стрессовых условиях среды;
- эквивалентное снабжение клеток энергетической валютой — аденозинтрифосфатом (АТФ), структурными предшественниками для синтеза запасных веществ: гликогена, жиров, нуклеиновых кислот и белков;
- сохранение систем, регулирующих скорости и направления метаболических процессов в соответствии с потребностями организма и их изменение при вариации внешних условий.

Определен ряд ключевых ферментов, которые изменяют активность в зависимости от степени загазованности окружающей среды: глюкозо-6-фосфат, супероксиддисмутаза, пероксидаза, фитогормоны, растворимые белки, липиды и т. д. Внутриклеточные макромолекулярные структуры надежно защищены от антропогенного влияния, и существенные нарушения в них приводят к гибели организма.

Большой интерес представляет явление «молекулярной мимикрии», т. е. встраивание изотопов типа C-14, Sr-90, I-131 и др. в молекулярные комплексы живых организмов, накопление их и распространение в популяции, приводящее

при достижении определенного критического уровня к развитию патологических процессов. К явлениям такого типа относится распространение плазмид — искусственных нуклеиновых остатков, синтезированных человеком. Попадая в организм человека и животных вместе с продуктами питания, они приводят к снижению иммунной устойчивости и невосприимчивости организма к медикаментозным средствам.

Мир одноклеточных состоит из большого числа микроорганизмов, грибов, водорослей, встречающихся практически во всех экологических нишах. Микроорганизмы обнаруживают в термальных источниках Камчатки при температуре больше 80 °С, на Северном полюсе, в глубине океана и на самых высоких вершинах. Обнаружены микроорганизмы, живущие в радиоактивной воде атомного реактора.

Все одноклеточные делятся на две большие группы: эукариоты (высшие микроорганизмы) и прокариоты — низшие, не имеющие ядра одноклеточные.

К эукариотам относятся водоросли, грибы-дрожжи и простейшие. Прокариоты — синезеленые водоросли и бактерии. Простейшие осуществляют биосферный кругооборот кальция, формируют и поддерживают плодородный слой почвы — гумус. В процессе эволюции биосферы виды одноклеточных организмов специализировались в определенных экологических нишах. Техногенное загрязнение атмосферы, почвы и водной среды, нарушая биологическое равновесие, приводило к образованию новых антропогенных экологических ниш, которые в первую очередь занимали микроорганизмы и вирусы. Об этом свидетельствует появление новых инфекционных болезней (СПИД, COVID-19), рост хорошо известных заболеваний, формирование лекарственно-устойчивых штаммов микроорганизмов. Следовательно, постоянный контроль видового разнообразия и численности

микроорганизмов и вирусов является одним из основных способов оценки состояния окружающей среды.

Увеличение количества синезеленых водорослей в проточных водоемах — характерный показатель загрязнения, заболачивания и деградации водоемов. Снижение количества азотных бактерий в почве приводит к разрушению гумуса. Следовательно, санитарно-эпидемиологический контроль состояния среды является необходимым компонентом существования человека.

1.3. Биоиндикационные показатели органов и тканей

Органы и ткани организма животных и растений проявляют дифференциальную чувствительность к различным антропогенным факторам. В середине 1850 г. наблюдались изменения окраски листьев растений при действии дыма и ядовитых газов. В настоящее время основанные на морфологии растений исследования, позволили построить картосхемы антропогенных влияний на фитоценозы. К наиболее распространенным морфологическим изменениям растений, используемым в качестве биоиндикации, относятся хлороз — бледная окраска листьев между жилками — отвалы тяжелых металлов. Пожелтение краев или определенных участков листьев у лиственных деревьев — влияние хлоридов. Покраснение в виде пятен на листьях смородины и гортензии происходит под действием SO_2 . Появление серебристой окраски поверхности листьев — действие фтористых соединений. Некрозы — отмирание ограниченных участков ткани листовой поверхности, развиваются в следующей последовательности: при действии SO_2 происходит образование грязно-зеленых пятен, после гибели пораженных клеток листа его участки оседают, высыхают и за счет выделения дубильных веществ

окрашиваются у деревьев в бурый цвет или выцветают до белой окраски у тюльпанов, лука, гладиолусов, зерновых культур.

Дефолиация — опадение листьев — происходила после появления некрозов и хлорозов. Под влиянием соли, используемой для таяния снега, осыпается хвоя ели, листва у лип и каштанов. При увеличении концентрации SO_2 в воздухе наблюдается опадение листвы крыжовника и смородины. Аномальные изменения формы, количества и положения органов происходят у лиственных и хвойных деревьев после радиоактивного облучения.

В результате локальных некрозов появлялась уродливая деформация: перетягивание, вздувание или искривление листовой пластинки, искривление побегов, сращение или расщепление отдельных органов. Под действием гербицидов наступает деформация цветка — увеличение или уменьшение; изменяется морфология лишайников.

Изменения направления формы роста и ветвления, кустовидная и подушечная форма роста деревьев у лип наблюдались при хроническом загрязнении атмосферы HCl или SO_2 . При высокой концентрации газообразных выбросов предприятиями отмечаются низкорослость растений, ползучие главные оси побегов, тесно расположенные узкие листья.

Нарушение прироста многолетних растений определяется по ширине годичных колец. Для определения ширины годичных колец используется тонкий бур, с помощью которого извлекается kern древесины, измеряется величина прироста по годам. Годовой прирост деревьев — неспецифический тест, но он позволяет непосредственно определить степень экологического неблагополучия в многолетней динамике. Используя способность деревьев к биоаккумуляции и консервации загрязняющих веществ, особенно хвойных деревьев, можно, применяя современные методы спектрального анализа, проводить

дифференциальную оценку степени загрязнения окружающей среды. Характерно, что значительные повышения концентрации С-14 в годичных кольцах деревьев Томской области достаточно хорошо совпадают с атомными испытаниями на Семипалатинском полигоне и авариями на атомных реакторах в г. Северске.

Одним из неспецифических тестов, отражающих видовую адаптацию растений, является цитологический тест стерильности пыльцы, широко использующийся для оценки химических загрязнений, радиоактивных, электромагнитных и других техногенных загрязнителей.

Для оценки состояния природных сообществ используется фенотипическая изменчивость природных популяций.

У высших животных, включая человека, при всем разнообразии индивидуальной адаптации ее развитие характеризуется общими закономерностями. Выделяются два этапа: первоначальный — срочная, но несовершенная адаптация; последующий — долговременная адаптация. Для обеспечения дополнительных энергетических затрат организма в процессе эволюции сформировался специальный физиологический механизм, впервые описанный Г. Селье (1960), названный стрессом, или общим адаптационным синдромом (ОАС). Стресс обеспечивается деятельностью гормонов надпочечников и половых желез. По совокупности физиологических показателей и состоянию надпочечных желез выделяют три стадии стресса: активация, тренировка, истощение, или дистресс. Последний наступает в том случае, если физиологическая система или весь организм не справляются с воздействующими на него факторами, что приводит к патологическим заболеваниям.

Последующее усиление отрицательно действующего фактора стимулирует патологическое изменение органа-мишени: воспаление легких, сердечная недостаточность,

цирроз печени, пиелонефрит, язвенные заболевания, и развитие онкологических заболеваний. Появление и развитие злокачественных заболеваний у животных используется в качестве биотеста, указывающего на полное несоответствие окружающей среды адаптационным возможностям организма.

При хроническом действии электромагнитных полей наблюдались онкологические заболевания кожи, мозга, грудных желез животных и людей. При действии радиации развивались канцерогенные заболевания крови — лейкозы. Выхлопные газы автотранспорта и аэрозоли угольной, нефтяной промышленности стимулируют заболевания легких. Тяжелые металлы, пестициды и органические загрязнения приводят к онкологическим заболеваниям желудка, печени и почек. Полициклические ароматические соединения вызывают рак мошонки.

В качестве примера рассмотрим ситуацию с судаком, запущенным как промысловая рыба в озеро Балхаш, на берегу которого находился один из крупнейших в СССР металлургических комбинатов, сливавший все неочищенные отходы в озеро. Выпущенный судак интенсивно размножился. Являясь хищником, он активно накапливал медь, тяжелые металлы, которые с отходами сбрасывались в течение многих лет в озеро. За 5—10 лет произошло массовое поражение рыбы злокачественными новообразованиями на голове, спине, брюшной стороне, видимое невооруженным глазом. Последующая массовая гибель судака облегчила его страдания, но не изменила экологическую ситуацию озера Балхаш.

Необходимо отметить, что различные органы в зависимости от их функционального назначения обладают способностью к накоплению радионуклидов, тяжелых металлов и токсических соединений. Стронций и цезий активно накапливаются в костях и печени животных. В печени и почках количество нуклидов может превышать их

содержание в мышцах в радиоактивно загрязненных районах в 1000 раз. Метилртутные и ртутьорганические соединения, накапливаясь в печени животных, легко проникают через гематоэнцефалический барьер мозга и вызывают нейротоксические эффекты. Разработан метод, позволяющий по количеству ртути в птичьих перьях оценивать общую загрязненность среды обитания птиц. Кадмий, являясь одним из самых токсических тяжелых металлов, способен долго сохраняться в организме животных. В печени у долгоживущих видов рыб и птиц концентрация кадмия повышалась в 3000 раз. Нитраты, накапливаясь в печени и почках, поступая в кровь, связываются с гемоглобином, препятствуют его средству с кислородом.

Следовательно, биоиндикация и биотестирование органов и тканей организма носит неспецифический характер на всех уровнях его устойчивости. Дифференцированная способность к накоплению различными органами техногенных веществ позволяет успешно выявлять характер загрязненности среды обитания.

1.4. Организменный уровень биоиндикации

Основной наблюдаемой единицей на уровне организмов является особь, семья или группа особей, наиболее чувствительной реакцией — комплекс поведенческих изменений, позволяющих выжить особи при изменившихся внешних условиях. Хорошо выраженные реакции можно наблюдать у пресноводной амёбы в зависимости от концентрации растворенных в воде химических веществ. При низкой концентрации токсических веществ амёба сокращает свои ложноножки, при увеличении концентрации она превращается в клубок и затем погибает.

Под микроскопом можно наблюдать за увеличением частоты сокращений пульсирующей вакуоли амебы в зависимости от концентрации токсических веществ в окружающей среде. Основная функция сократительной вакуоли — регуляция осмотического давления внутри тела простейшего. При попадании токсических веществ в организм амебы сократительная активность пульсирующей вакуоли увеличивается.

Большое разнообразие в поведении характерно для пауков. Насчитывается около 50—60 тыс. видов пауков, заселивших практически все возможные экологические ниши, занятые беспозвоночными. Хищники, пауки концентрируют в организме токсические вещества, изменяющие их поведение. Особый интерес в биоиндикационном отношении представляет строительная деятельность пауков. Пауки строят свои ловчие сети на деревьях, траве, в норках. Паутиной обернуты и коконы с яйцами у бегущих пауков. Из паутины строятся семейные домики, в которых паучата проводят свои первые две-три личиночные стадии. Вся строительная деятельность пауков может быть промерена, сфотографирована, снята на видеокамеру в природных условиях с различной антропогенной нагрузкой и в модельных условиях при дозированных воздействиях физических, химических и биологических факторов.

Особый интерес представляют структурированные сети, т. е. ловчие сети пауков, имеющие вполне определенную структуру, характерную для каждого вида крестовиков (*Araneidae*). Ловчую сеть пауки-крестовики начинают строить после выхода из семейного домика на третьей личиночной стадии. Для каждой возрастной стадии пауков существует характерная структура паутины. С наступлением половой зрелости ловчие колесовидные сети плетут в основном только самки, самцы заняты поиском самок и выполнением своей репродуктивной функции.

Восстановление ловчих сетей происходит при отсутствии дождя ежедневно. Нарушенные в течение предыдущего дня участки паутины съедаются, так как паутинные нити преимущественно состоят из аминокислот. Как правило, восстановление паутины происходит в утренние предрассветные часы, в 5—7 ч.

Повсеместная распространенность пауков-крестовиков от тундры до пустыни, хорошая наглядность ловчих сеток, особенно утром, когда капельки росы проявляют тонкую структуру паутины, небольшое количество времени, необходимое для набора статистического материала, — все это делает ловчую сеть пауков одним из привлекательных биоиндикационных экспресс-методов. В России обитает от 10 до 18 видов рода крестовиков (*Araneus*). Наиболее распространенными являются крестовик обыкновенный и крестовик мраморный. Наличие специального убежища из свернутых листьев и сигнальной нити позволяет крестовику мраморному строить свои сети в лесу и на открытых местах, не рискуя быть заметной добычей для птиц, что характерно для крестовика обыкновенного. Строя свои сети на относительно открытых пространствах, пауки подвергаются влиянию антропогенных факторов, существующих в данной местности: радиации, электромагнитных полей, химических веществ, аэрозолей, которые вместе с конденсатом накапливаются на клейких ловчих сетках паука и поедаются вместе с нарушенными участками ловчей сети. Так хищники пауки накапливают тяжелые металлы и токсические вещества, нарушающие их поведение.

Необходимо отметить, что все алгоритмы пищевой деятельности животного фиксируются в структуре ловчей сетки. При необходимости можно легко узнать, чем и в каком количестве питается паук, потому что жертвы удачной охоты также фиксируются с помощью паутины.

Ежедневное возобновление строительства ловчих сеток позволяет проследить влияние одного антропогенного фактора или их комплекса. Анализ структуры паутины необходимо проводить рано утром, когда она еще покрыта росой, хорошо заметна и не нарушена попавшими в нее насекомыми. В искусственных условиях пауки хорошо плетут паутины в садках размером 1 м³ из марли или оконной сетки с выдвигаемыми стенками. В таких садках можно исследовать дифференциальную чувствительность, устойчивость пауков и форму структуры их ловчих сеток в зависимости от концентрации токсичных веществ или уровня физических воздействий. Экспериментальное построение аналогичных калибровочных кривых значительно повышает достоверность интерпретации биоиндикационных оценок в природных условиях¹.

Схема типичной ловчей сети паука-крестовика представлена на рис. 1.1.

¹ *Карташев А. Г., Карташева А. А.* Структура ловчих сетей пауков-кругопрядов. Томск: Изд-во ТусУР, 2009.

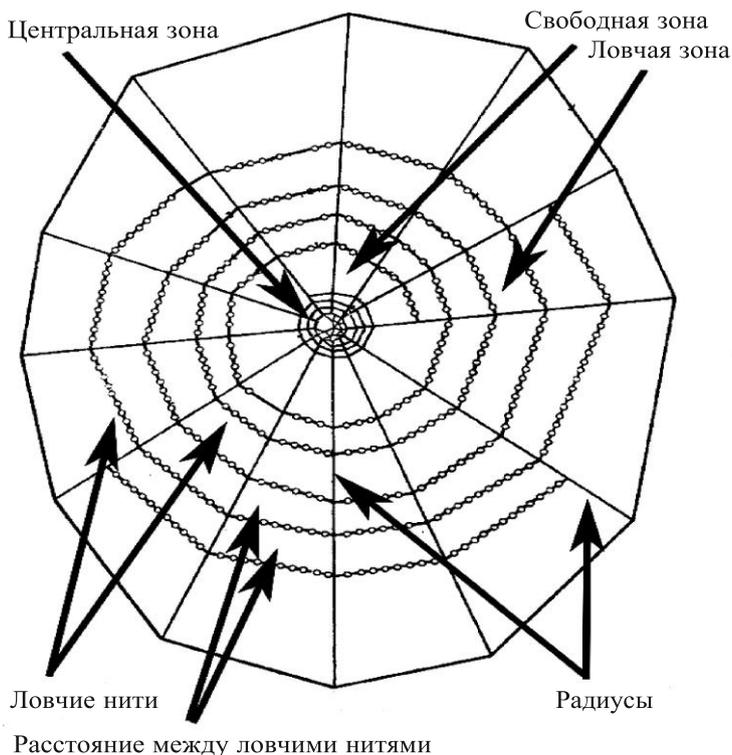


Рис. 1.1. Схема ловчей сети паука-крестовика

Центральная зона заплетена неклеякими нитями, и количество витков в центральной зоне является видовым признаком рода пауков-крестовиков. Далее следует незаплетенный промежуток свободной зоны, за которой следуют клейкие витки ловчей зоны, натянутые на радиусы, исходящие из центральной зоны.

Для количественной оценки структуры ловчей сети пауков-крестовиков использовались следующие показатели: высота центра над землей, число верхних, нижних радиусов, длина радиусов, число витков центральной зоны, вертикальный и горизонтальный диаметры центральной зоны, вертикальный и горизонтальный размеры свободной зоны, вертикальный и горизонтальный размеры ловчей зоны, число ловчих нитей в секторах: по горизонтали и

вертикали, расстояние между ловчими нитями, количество и тип отклонений (аномалий) в структуре ловчей сетки паука.

Анализ примерно 10 тыс. ловчих сетей пауков-крестовиков (*A. marmoreus*) позволил выделить достаточно типичные аномалии в структуре ловчих сетей пауков-кругопрядов (рис. 1.2, 1.3).

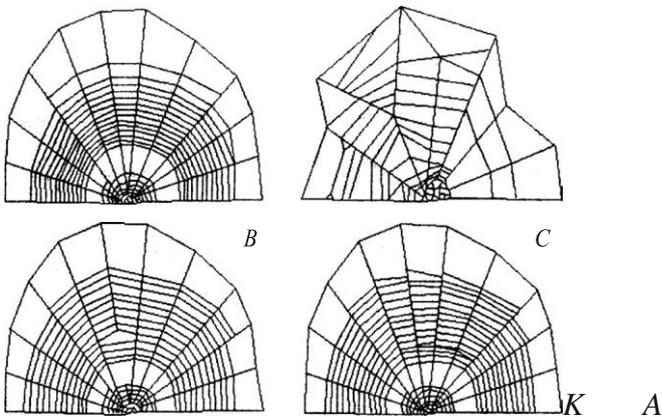


Рис. 1.2. Типы аномалий в ловчих сетях пауков-кругопрядов:

К — фрагмент эталонной ловчей сети; *А* — абсолютно аномальная сеть; *В* — укороченный радиус; *С* — ступенчатость ловчей спирали

Полностью аномальная сеть, сектор которой представлен на рис. 1.2, *А*, характерна для патологически больного паука, на которого экологическая среда, токсические вещества повлияли в такой степени, что животное утратило способность плести нормальную сеть и погибло. Изменения в структуре ловчих сетей, определенные как аномалии, отражают нарушения в поведении пауков.

Таким образом, вся картина дифференцированной поведенческой адаптации, позволяющей различить тип воздействующего фактора, наблюдалась в диапазоне

структурных нарушений ловчей зоны пауков от *K* до *A*. В экспериментальных условиях при искусственном облучении пауков в дозе от 10 до 100 Р/ч получены аномалии типа *F*, проявляющиеся в незаплетении одного, двух или трех секторов ловчей зоны.

Необходимо отметить, что пауки устойчивы к действию радиации. В наших опытах пауки погибали только при дозе облучения, равной 1500 Р/ч, в то время как нормальной фоновой дозой является 12 мкР/ч. При искусственном облучении возрастало количество различного типа аномалий: чем выше доза, тем чаще встречаются аномалии типа *F* и *A*. Следовательно, поведенческая реакция пауков отражает реальную интегральную биологическую опасность радиоактивного загрязнения. В интегральную картину радиоактивного влияния можно включить излучения, радионуклиды, циркулирующие по пищевым цепям, и суммарное количество радиоактивных выбросов. На основании паутинного теста, используемого в качестве биоиндикационного экспресс-метода, можно довольно хорошо проводить качественную комплексную оценку радиоэкологической обстановки.

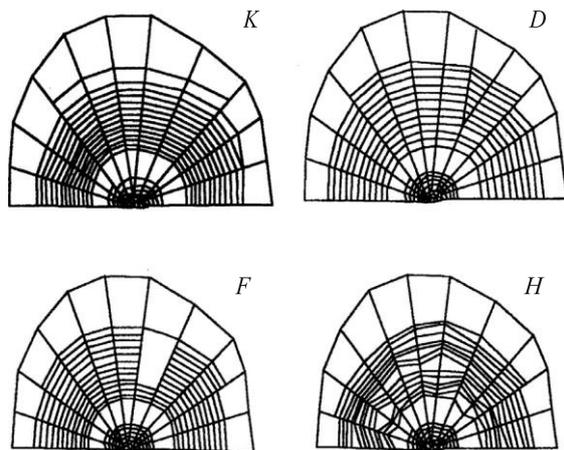


Рис. 1.3. Типы аномалий в ловчих сетях пауков-кругопрядов:

K — фрагмент эталонной ловчей сети; *D* — раздвоение радиуса; *F* — отсутствие ловчих нитей в секторе; *H* — ломаная ловчая спираль

С целью выяснения особенностей в поведенческой реакции пауков при действии химических веществ использовалась аминная соль, раствором которой из пульверизатора опрыскивались сетки пауков крестовиков. В результате проведенных исследований выяснилось, что в зависимости от концентрации раствора аминной соли происходило увеличение общего количества нарушений структуры ловчих сетей с преобладанием аномалий *C*-типа. Эти аномалии выражались в нарушении параллельности по секторам клейких ловчих нитей паутины. При повышении концентрации аминной соли количество непараллельных секторов увеличивалось, росло число других видов аномалий: асимметричность всей сети, полностью аномальные сети.

Необходимо отметить, что в районах нефтезагрязнений пауки практически не встречались, не выживали и насекомые.

Количественный учет ловчих сетей пауков, проведенный ранним росистым утром, может быть использован в качестве биоиндикации массового скопления летающих насекомых. Вдоль рек и озер плетет свои круговые горизонтальные сети паук-кругопряд семейства *Tetragnathidae*. Ловчие сети тетрагнат хорошо структурированы. Ареал их распространения широк: зона тайги, Камчатка, Средняя Европа, Казахстан, Туркмения. Повышение численности тетрагнат связано с вылетом приводных насекомых.

1.5. Нарушения в онтогенезе биосистем

Онтогенез — индивидуальное развитие организма от зародыша до смерти. Биологический период жизни каждого организма в зависимости от вида биосистем колеблется от суток до тысячи лет (деревья). В процессе онтогенеза проявляются способности организма к выживанию и созданию репродуктивного потомства. Развитие особи происходит нормально только в определенном диапазоне экологических факторов.

В процессе индивидуальной жизни каждая особь отличается от других особей данного вида. Индивидуальные особенности особей определяют полиморфизм популяции, вероятность разнообразия признаков будущей популяции с помощью естественного отбора реализуется в онтогенезе. Информация, выявленная в процессе индивидуального развития, обладает высокой прогностической ценностью. Все адаптационные изменения в онтогенезе можно разделить на индивидуальные и видовые.

К видовым приспособлениям относят смертность особей на различных этапах индивидуального развития, тератогенез — врожденные аномалии развития, препятствующие нормальному размножению, и нарушения в репродуктивной системе: сперматогенез, оогенез.

К индивидуальным адаптациям относится комплекс физиологических механизмов, обеспечивающих гомеостаз и гомеорезис организма. Хроническое воздействие электромагнитных полей при увеличении напряженности приводило к повышению частоты колебаний физиологических показателей индивидуальной адаптации в постнатальном онтогенезе белых мышей, в то время как показатели видовой адаптации животных изменялись по амплитуде. Увеличение по амплитуде показателей видовой адаптации в онтогенезе сопровождалось летальностью наиболее неустойчивых особей. При последующем

повышении интенсивности фактора и частоты колебаний показателей индивидуальной адаптации происходил срыв систем гомеостаза, развивались патологии, приводящие к летальному исходу. Следовательно, в онтогенезе животных формировалась модель амплитудно-частотного типа развития адаптивных реакций.

Все устойчивые этапы онтогенеза — эмбриональные, личиночные и постнатальные — разделены критическими периодами, в которых осуществляется переход от одного типа возрастного гомеостаза к последующему возрастному этапу. Критические периоды являются чувствительными этапами индивидуального развития организма. В критические периоды энергетические и метаболические ресурсы направлены на создание относительно нового организма, соответствующего новому возрастному состоянию, и защитные механизмы адаптации наименее устойчивы к действию негативных факторов. Критические периоды, как правило, ограничены во времени и защищены поведенческими алгоритмами.

Хронические антропогенные факторы, не вызывающие серьезных изменений в возрастных периодах онтогенеза, оказывают существенное биологическое влияние в критические периоды развития. Хроническое действие переменного электрического поля (40 В/м, 50 Гц) приводит к выраженным нарушениям в системе надпочечных и щитовидной желез в критические периоды развития организма животных.

Необходимо отметить, что современные предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и предельно допустимые уровни (ПДУ) физических воздействий разрабатывались без учета критических периодов индивидуального развития животных и человека. В качестве биоиндикаторов онтогенеза целесообразно использовать наиболее чувствительные этапы онтогенеза. Таким этапом, по мнению большинства исследователей,

является эмбриональный период развития живых организмов.

Как правило, эмбриональные изменения носят неспецифический характер, по ним оценивают общую экологическую напряженность и только в отдельных случаях при проведении дополнительных экспериментальных исследований может быть выявлена специфичность повреждающего фактора. Различного рода тератогенные изменения растений и животных успешно используются в качестве индикаторов степени загрязнения биогеоценозов.

В качестве показателей анализировалась частота встречаемости различных отклонений в развитии деревьев: карликовость, ветвистость, компактность, образование наростов на стволах. Для оценки репродуктивной способности растений использовалась плодовитость, асинхронность в развитии соцветий, степень стерильности соцветий, бутонов и пыльцы (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Соотношение мутагенных, гонадотропных и эмбриональных эффектов техногенных факторов

Фактор	Мутагенность	Гонадотропность	Эмбриотропность
Этиленимин	+	+	+
Хлоропре- н	+	+	+
Оксид этилена	+	-	-

Уретан	+	-	+
Тетрациклин	+	+	+
Винилхлорид	+	-	-
Пирролин	-	+	-

Окончание табл. 1.1

Фактор	Мутагенность	Гонадотропность	Эмбриотропность
Динил	-	-	+
Капролактамы	-	+	+
Диметилформамид	-	-	+
Фенол	-	+	+
Бензол	+	-	+
Бензин	-	+	+
Бенз(а)пирен	-	-	+
НСI	-	-	+
2, 4, 5-Трихлорфеноксиуксусная кислота	+	+	+
Радионуклиды	+	+	+
Электромагнитные поля	-	+	+
Шум > 90 дБ	-	-	+
Кадмий	-	+	+
Ртуть	-	+	+

Цинк	–	+	+
------	---	---	---

При развитии икринок форели в среде с бенз(а)пиреном в концентрациях, соответствующих загрязненным рекам, повышалось в четыре раза число морфологических аномалий: отсутствие пигментации, деформация позвоночника, аномальное развитие или отсутствие глаз. Аналогичные изменения отмечались при действии малатиона на лягушечью икру. Неоднократно наблюдались случаи появления уродливых птенцов при попадании в корм полихлорбифенилов (ПХБ).

Задержка в развитии, росте и созревании организмов является чувствительным биоиндикаторным показателем загрязнения окружающей среды. Дафнии при загрязнении водоемов откладывали в выводковую камеру неоплодотворенные яйца, из которых выходят только самцы. Установлено, что растворенные в воде хлорорганические вещества прекращают развитие некоторых видов морского фитопланктона. Токсины цианобактерий при загрязнении водоемов органикой угнетают рост пресноводных рыб.

Для оценки репродуктивной функции универсальным тестом являются процессы сперматогенеза и оогенеза. Процесс сперматогенеза за исключением небольших вариаций остается неизменным у всех беспозвоночных и позвоночных животных и состоит из образования диплоидных сперматогоний, сперматоцитов, делений с образованием гаплоидного числа хромосом — сперматид, и их дифференцировкой в сперматозоиды. Конечным результатом всех адаптивных реакций организма является численность потомства. Изменения в системе сперматогенеза и оогенеза использовались в качестве одного из универсальных биотестов при оценке устойчивости биосистем к антропогенным загрязнениям окружающей среды.

В наших исследованиях выявлен дифференцированный характер изменений в системе сперматогенеза мышей в зависимости от природы действующего фактора. Хронические дозы радиации 5 рад приводили к нарушениям в делении сперматогоний, хроническое воздействие переменного электрического поля (40 кВ/м, 50 Гц) вызывало нарушения при дифференцировке сперматид в сперматозоиды. Как в первом, так и во втором случае наблюдалась стерильность организма в более раннем возрастном периоде, чем у группы контрольных животных¹.

Довольно эффективным показателем является количество находящихся на последней стадии зародышей в икре лягушек и рыб. У мышевидных грызунов при ухудшении экологических условий происходила резорбция, или рассасывание, эмбрионов. Гистоморфологическими методами можно определить первоначальное число эмбрионов.

Немалое значение в индивидуальном развитии животных имеют онкологические заболевания, провоцируемые токсическими веществами антропогенного происхождения. Практически все виды животных, обитающих в различных средах, чувствительны к загрязнениям. В связи с тем, что патологические процессы онкологических заболеваний протекают по общему механизму, выявление частоты их встречаемости у животных может стать перспективным направлением биоиндикационной оценки состояния природной среды. Методики определения онкологических заболеваний животных сравнительно нетрудоемки, позволяют обнаружить очаги заболеваний и сделать ретроспективные выводы о вероятности развития онкогенеза у проживающих в данном районе людей.

¹ *Карташев А. Г.* Влияние хронических факторов в постнатальном онтогенезе животных. Томск : Изд-во В-Спектр, 2010.

1.6. Популяционно-видовой уровень биоиндикации

Все виды животных организмов в естественных условиях представлены конкретными популяциями. В современной экологии популяции живых организмов рассматриваются как элементарные единицы микроэволюции, способные реагировать на изменения среды перестройкой генофонда. Под влиянием антропогенных факторов одни популяции вымирают, другие, более устойчивые и проще организованные, — расширяют ареалы обитания. К первому типу видов животных и растений можно отнести сокращающиеся популяции, занесенные в Красную книгу животных и растений. Численность данных видов является индикатором экологического благополучия рассматриваемого района. Элиминация видов из среды обитания рассматривается как изменение эволюционно сложившихся природных сообществ.

Растения. Размеры ареалов популяций растений существенно зависят от газодымных выбросов. В многолетних наблюдениях загрязненности как биоиндикатор использовался дымоустойчивый вид накипного лишайника (*Liecanora coniza-coides*), который встречается на всех древесно-кустарниковых породах. Снижение обилия лишайников коррелирует с концентрацией SO_2 в воздухе. Водное растение чилим (*Trapa natans*) распространено только в чистых, незагрязненных водоемах. Значительное сокращение чилима в реках и озерах Европы происходило в результате увеличения концентрации углекислоты.

Аэрозоли ZnO , PbO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 и NCl отрицательно влияют на рост пихты, ели и сосны. Необходимо отметить, что пихта чувствительна к атмосферным и гидрологическим загрязнениям. Картирование ареалов пихты в многолетней динамике может использоваться в качестве оценки степени

загрязнения атмосферы промышленными предприятиями. Высокой устойчивостью к SO₂ обладает японская лиственница. Вытеснение японской лиственницы обыкновенной свидетельствует о неблагоприятной экологической ситуации.

По отношению к тяжелым металлам можно выделить ряд устойчивых растений: подорожник устойчив к мышьяку и оксидам свинца автомобильных газов; полевица (*Agrostis tennis*) устойчива к меди; смолевка хлопущка, фиалки (*Viola calaminaria*), армерия Галлера, армерия приморская растут на старых отвалах медных рудников.

Весь комплекс антропогенных факторов оказывает влияние на растительность, изменяет эволюционно сложившиеся ареалы популяций растений. Для оценки и прогнозирования экологических ситуаций необходимы составление подробных геоботанических карт и разработка на их основе долговременных комплексных рекультивационных мероприятий в зависимости от целевого использования природных территорий.

Беспозвоночные. Используя популяции беспозвоночных животных в качестве биоиндикаторов, можно охватить все известные среды обитания биосистем. Популяционные показатели позволяют оценить антропогенное влияние на беспозвоночных, учесть антагонизм, синергизм действия загрязнителей и их модификацию.

Биоиндикаторами служат виды животных, жизненные функции которых коррелированы с факторами внешней среды. Наблюдаемые изменения показателей состояния популяций необходимо соотносить друг с другом или с контролем по схеме.

Абсолютные стандарты:

- сравнение с характеристиками объектов, находящихся вне зоны действия;

- сравнение с экспериментальными результатами;
- сравнение с характеристиками объектов, полученными в прошлом;
- изучение градиента изменений одного и того же объекта.

Относительные стандарты:

- выявление корреляций с пространственно-временными изменениями условий обитания;
- выявление эталонных объектов, незначительные антропогенные влияния;
- сравнительный перекрестный анализ по абсолютным и относительным стандартам.

Выделяют следующие группы основных индикаторов:

- 1) реагирующие на нарушения экологической ниши — виды-указатели;
- 2) аккумулирующие загрязняющие вещества — тест-виды;
- 3) устойчивые к загрязнениям виды-восстановители.

Выбранные виды должны обладать малой подвижностью, быть массовыми, широко распространенными, однородными в таксономическом плане, с исследованной популяционной структурой, обладать широкой индикационной пластичностью.

В качестве индикаторов используются различные группы беспозвоночных, в лучшей степени вопрос разработан для почвенных и водных видов¹.

Анализ коэффициентов корреляции между уровнями загрязнений, определяемыми техническими средствами и отловом в почвенные ловушки представителей энтомофауны, позволил выявить, что для индикации SO₂ могут быть использованы стафилиниды и тараканы (коэффициенты корреляции $-0,649$ и $-0,535$ соответственно); оксидов азота — жужелицы ($-0,63$); фтора

¹ Карташев А. Г. Адаптация животных к хроническим факторам. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, 2014.

— долгоносики (–0,52), полужесткокрылые (–0,48) и жужелицы (– 0,47).

Изменение условий местообитания отмечалось у короедов в загазованных насаждениях, что выражалось в заселении несвойственных им участков ствола, искривлении маточных ходов и отсутствии отдушин для видов, обитающих под толстой корой. При исследовании чешуекрылых фитофагов в зоне загрязнения комбината «Североникель» установлено изменение характера распределения мин первичных беззубых молей семейства *Eriocraniidae*, выражающееся в переходе от равномерного распределения по кронам берез к преимущественно групповому в нижнем ярусе крон. Большой интерес вызывают изменения структуры популяции фитофагов при действии антропогенных факторов: размещение фитофагов по частям листа, листьям годичного побега, типам побегов, ярусам кроны растений, характер распределения колоний и особей. Перспективным представляется использование в качестве биоиндикатора популяционной структуры: пространственной, временной, возрастной, ловчих сетей и семейных домиков пауков.

Наиболее многообещающей группой беспозвоночных для использования в качестве биоиндикаторов химического загрязнения почвы являются дождевые черви, раковинные амёбы, почвенные инфузории и нематоды. В 1 га земли находится от 300 тыс. до нескольких миллионов дождевых червей, которые пропускают через свое тело от 2 до 5 г почвы в сутки, перерабатывают растительные остатки и роют ходы глубиной до 1,5 м. Длительность жизни дождевых червей составляет от 4 до 6 лет — период, в течение которого в теле животного могут накапливаться токсины, тяжелые металлы и радионуклиды. Численность червей, их возрастная структура использовались в качестве биоиндикаторов при проведении экологического мониторинга почв. Последующий химический анализ

организма животных позволил определить доминирующие токсические факторы, снижающие численность дождевых червей и загрязняющие почвенный слой.

Класс насекомых считается самым многочисленным и многообразным по количеству представленных видов в биосфере. Обладая относительно небольшим периодом индивидуальной жизни — от месяца до нескольких лет, насекомые способны в большей степени, чем другие животные, видоизменяться и адаптироваться. Практически все антропогенные изменения окружающей среды можно прогнозировать на основе биотестирования насекомых. Нарушение трофического поведения гусениц тутового шелкопряда отмечено при действии фтора. Изменение роющей активности муравьев *Formica polyctena* при действии пестицидов коррелирует с их выживаемостью. При действии инсектицидов наездники-бракониды переставали откладывать яйца в тела тлей и совершали чистящие движения. Общее физиологическое состояние организма насекомого, определяемое по количеству гемоцитов, хорошо коррелирует с загрязнением сернистым ангидридом и тяжелыми металлами.

В ряде случаев наблюдалось повышение устойчивости насекомых к инфекционным заболеваниям. Гусеницы соснового шелкопряда в зоне среднего антропогенного загрязнения оказались в два раза более устойчивыми, чем гусеницы из чистых местообитаний. Наблюдалось отсутствие летней диапаузы у жувелиц в зоне загрязнений тяжелыми металлами. Нарушение коммуникационного поведения сообществ муравьев, пчел отмечалось при повышении содержания соединений меди, цинка, хрома, солей ртути, кадмия, свинца.

Отсутствие муравейников в типичных биоценозах может использоваться при биотестировании тяжелых металлов. Обычно радиус охотничьих троп лесного муравейника — 50—100 м. С большой уверенностью можно считать, что в

этом же радиусе снижена численность иксодовых клещей. Довольно широкое распространение получило определение концентрации тяжелых металлов и других токсических соединений в меде и прополисе. Собирая пробы меда и прополиса в различных регионах, можно составить подробную карту их загрязненности и осуществлять мониторинг экологического состояния окружающей среды.

Переменное электрическое поле линий электропередачи (ЛЭП) и подстанций при напряженности 10 кВ/м и выше изменяет траекторию полета крупных насекомых: стрекоз, бабочек. У бабочек в результате наведенного электростатического заряда при полете через ЛЭП в непосредственной близости от проводов наблюдается эффект «схлопывания». Бабочки падают на землю, «разражаются» и поднимаются в воздух.

В водоемах оценка степени загрязненности проводилась на основе анализа донных сообществ беспозвоночных и зоопланктона. Разработанная система показателей включает: численность донных беспозвоночных N (количество/м²); биомассу донных беспозвоночных B (г/м²); количество таксонов S ; индекс видового разнообразия H ; индекс доминирования d ; индекс сапробности Y_s , хирономидный индекс K ; олигохетный индекс H_g , биотический индекс W . В соответствии с принятыми классами чистоты пресных вод по пятибалльной системе устанавливается шкала присутствия донных беспозвоночных:

- I и II классы — незагрязненные водоемы;
- III класс — слабая загрязненность, личинки насекомых, хирономиды, ручейник, моллюски, зоопланктон;
- IV класс — умеренная загрязненность, олигохеты — трубочник, хирономиды, моллюски;

- V класс — сильная загрязненность, трубочник.

Следовательно, в чистых водоемах биоиндикаторами являются ручейник и личинки насекомых. В загрязненных водоемах трубочник — индикатор органической загрязненности; хирономиды (мотыль) аккумулируют тяжелые металлы и радионуклиды.

Общей характеристикой сильно загрязненных водоемов является тенденция к уменьшению и исчезновению в составе зоопланктона фильтраторов с преобладанием собирателей и хватателей (табл. 1.2).

Известны примеры использования биоиндикаторов на предприятиях. Так, контроль над экологическим состоянием воздуха в районе завода по сжиганию осадка сточных вод в Санкт-Петербурге осуществлялся представителями животного мира. Речные раки контролировали состояние воды, гигантские африканские улитки следили за чистотой воздуха. Зоологи предприятия «Водоканал Санкт-Петербурга» установили, что брюхоногие моллюски *Achatina* дышат воздухом с примесью дыма, выходящего из трубы завода. К их раковинам прикреплялись оптоволоконные датчики сердцебиения и двигательной активности. Показания приборов о функциональном состоянии животных считывались с помощью специальной программы в автоматическом режиме. Если все улитки начинают хуже себя чувствовать, то система подает сигнал и специалисты выясняют причины ухудшения состояния воздуха.

Таблица 1.2. Биоиндикационные характеристики загрязненности водоемов

Критерий	Низкая загрязненность (олигосанпробы)	Средняя загрязненность		Высокая загрязненность (полисанпробы)
		α-мезосанпробы	β-мезосанпробы	
Содержание O ₂	8 мг/л	6 мг/л	2 мг/л	< 2 мг/л
БПК ₅	1 мг/л	2—6 мг/л	7—13 мг/л	15 мг/л
Количество планктона	Малое	Большое	Среднее	Отсутствует
Видовой состав	Аэробные бактерии, водоросли, коловратки, планарии	Нитевидные бактерии, водоросли, креветки, улитки	Анаэробные бактерии, синезеленые водоросли, простейшие, пиявки, трубочник	Синезеленые водоросли, трубочник, хирономиды, ресничные инфузории, грибы
Рыбы	Лососевые	Многих разных видов	Мало видов	Отсутствуют

Система биомониторинга воздуха на границе санитарно-защитной зоны завода реагирует не только на значительные по величине изменения степени загрязненности воздуха. На заводе есть индикаторная «спецгруппа» улиток. По их состоянию фиксируется накопление негативного влияния на здоровье, связанного с хроническим токсическим воздействием загрязняющих веществ, выбрасываемых с дымовыми газами. Биоэлектронная система разработана учеными Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности.

Предварительный и далеко не полный анализ возможностей беспозвоночных как индикаторов степени экологической загрязненности показывает актуальность разработки биоиндикационных методов с использованием беспозвоночных животных.

Рыбы. Необходимо отметить одну характерную для всего класса биоиндикационную черту. Виды рыб, обладающие высокими вкусовыми и питательными качествами, живут и нерестятся в чистых, не загрязненных водоемах. Для нормального нереста ценных в промысловом отношении рыб (сиг, лосось, осетр, стерлядь, хариус, форель) необходима чистая холодная вода с максимальным количеством растворенного в ней кислорода. Все наиболее ценные морские обитатели (омары, угри, миноги и т. д.), для сохранения своей популяции нуждаются в чистых, не загрязненных водах. Карповые (лещ, язь, карп, елец, карась) хорошо размножаются в теплых и загрязненных водах. Естественно, что соотношение численностей популяций ценных промысловых рыб и общей численности рыб является индикатором степени загрязненности водоемов. В данном случае экономические интересы общества совпадают с экологической целесообразностью.

К видам, наиболее устойчивым к органическим, радионуклидным загрязнениям и загрязнениям тяжелыми металлами, относятся популяции карася, карпа, леща и

гольяна. Представителями чистой воды являются речная минога, таймень, хариус, сиговые, лососевые, осетровые и т. д. У рыб, планктона и моллюсков при закислении водоемов и $\text{pH} < 5,2$ нарушается обмен Ca^{2+} . У моллюсков разрушаются раковины, у рыб нарушается минеральный обмен. При $\text{pH} < 4,5$ из силикатов выщелачиваются ионы алюминия (Al^{3+}), что вызывает некрозы тканей организма рыб и их гибель.

Одной из основных характеристик популяции рыб является возрастная структура. В экологически устойчивых водоемах все три группы представлены приблизительно в равных соотношениях. Наличие старых крупных особей всегда являлось индикатором природной чистоты водоема. При загрязнении водоемов наряду со снижением видового разнообразия увеличивается численность молодых особей, карликовых с ускоренным периодом созревания. Высокая выживаемость гольяна в загрязненных техногенными выбросами водоемах Томской области объясняется способностью рыб к многократному нересту в течение одного сезона. Рыбы откладывали икру, вылупившиеся мальки на 80—90 % не доживали до взрослого состояния, происходил повторный нерест и т. д.

В сильно загрязненных водоемах при отловах доминировали молодые недоразвитые особи популяций устойчивых к загрязнению рыб. В реках, где уровень радиоактивности на поверхности колеблется от 30 до 700 мкР/ч , наблюдались различные морфофизиологические изменения в организме карася, сазана, судака и щуки: пучеглазие $\sim 5\%$, отечность тела и брюшка $\sim 5\text{—}25\%$; полное разрушение структуры чешуи $\sim 7\%$; частичная дезориентация чешуи $\sim 5\text{—}16\%$; структурные нарушения в семенниках рыб $\sim 8\text{—}25\%$; частичная дегенерация ооцитов $\sim 8\text{—}25\%$; недоразвитие гонад $\sim 8\text{—}13\%$; полная дегенерация ооцитов $\sim 9\text{—}12\%$; деформация ооцитов $\sim 14\text{—}50\%$. Следовательно, снижение видового

разнообразия, численности ценных в промысловом отношении рыб, уменьшение размеров и преобладание молоди в возрастной структуре являются биоиндикаторами ухудшения экологического состояния водоемов.

На северо-востоке Японии, где происходят подземные толчки, страдают не только люди, но и животные. Выяснилось, что птицы и рыбы могут предсказывать землетрясение за несколько месяцев до того, как оно происходит. Несколько месяцев перед землетрясением японские рыбаки вылавливали сетями глубоководную ремень-рыбу. Эта длинная и тонкая обитательница океана, похожая на змею, обычно не поднимается на глубину выше 200 м. Они массово всплывали перед чилийским и тайваньским землетрясениями. Согласно японским легендам рыба-ремень всплывает, чтобы предупредить о надвигающемся землетрясении. Сомовые рыбы очень чувствительны к геомагнитным изменениям. Были попытки использовать эту способность, чтобы предсказывать сейсмические процессы.

Наиболее чувствительной формой поведения рыб при изменении физико-химических свойств водоемов является нерестовая миграция лосося, сига, осетра, стерляди, муксуна, хариуса. Известно, что наиболее ценные породы рыб мечут икру в чистой воде при максимальной концентрации в ней кислорода. Ориентация на место нерестилищ происходит у рыб с помощью органов боковой линии и химических рецепторов. Естественно, что всякое химическое и электромагнитное загрязнение рек и озер нарушает нерестовую миграцию рыб. Так, в Томской области в результате активной добычи нефти и загрязнения рек нарушалась сезонная миграция осетровых. Полупроходная рыба муксун поздней осенью приходила на нерест в реки Томь, Чулым и другие малые реки. Регулярные сбросы в Томь токсических веществ, включавших фенолы и другие органические соединения,

привели к загрязнению реки и снижению численности нерестовых косяков муксуна. Он стал нереститься в низовьях Томи и Оби. Перестроечная волна закрытия предприятий значительно снизила количество сбрасываемых токсических веществ в реку Томь, и в течение 1993—1997 г. наблюдалось увеличение численности нерестящегося муксуна в Томи. Аналогичная ситуация наблюдалась и в некоторых малых реках Кемеровской области, где за последние 5 лет появились не встречавшиеся более 30 лет хариус, таймень и речная минога.

Современное строительство нефтепроводов и газопроводов, пересекающих речные бассейны, и антикоррозийная электрохимическая защита трубопроводов при подаче на поверхность трубы электростатического потенциала 8—36 В, а в случае появления коррозии и ток, равный 2 А, препятствуют нерестовой миграции рыб. В области нефтепровода наблюдалась задержка сезонной и нерестовой миграции: стерляди — в 2—3 раза, муксуна — в 3—6 раз. Экспериментальные исследования показали, что незначительное количество (ДДТ) и хлорофоса вызывает угнетение дыхания и авитаминоз у беспозвоночных гаммарид и рыб. Сотрудниками Московского государственного университета разработана методика контроля качества воды при фенольном загрязнении, основанная на характерном изменении поведения рыб. Используя как индикатор рыб *Micropterus salmoides*, зарегистрировали в воде концентрации ртути — 0,05 мг/л, меди — 0,05 мг/л, кадмия — 0,2 мг/л, фенола — 0,5 мг/л, аммония — 1 мг/л, цианидов — 0,05 мг/л. Значительное повышение загрязненности водоемов органическими отходами, тяжелыми металлами и радионуклидами приводило к изменению морфологии организма рыб. Наибольшие нарушения наблюдались в плавниках рыб,

особенно в спинном плавнике. У голяна в Томской области в спинном плавнике происходило сокращение числа отростков, иногда наблюдалось их увеличение. Интересную трансформацию претерпел карась, обитающий в реке с повышенной радиоактивностью. Известно, что караси — гермафродиты, т. е. у них имеются как женские, так и мужские половые органы, но начиная с 1990 г. в речке регулярно отлавливали разнополых карасей.

Амфибии и рептилии. Они могут быть названы индикаторами чистых или умеренно загрязненных мест обитания. Проживая в местах с повышенной влажностью, в низинах, где образовывались небольшие водоемы при стоке вод, собирающие токсичные вещества с большой поверхности, амфибии и пресмыкающиеся, вероятно, в большей степени подвергаются воздействию техногенных загрязнений. Необходимо отметить практическую ценность лягушек и жаб, которые уничтожают вредителей сельскохозяйственных культур: слизней, личинок, жуков и других беспозвоночных. Повышение численности популяций лягушек и жаб на мичуринском участке — хороший индикатор его экологического благополучия. Для оценки загрязненности территории удобно пользоваться относительным учетом амфибий. Весной около небольших водоемов собираются жабы, количество икры жаб и лягушек можно соотнести с относительной численностью головастиков на различных стадиях развития, которые питаются водными растениями и растительными отходами.

Питание змей разнообразно. В лесной зоне Сибири более 50 % пищи змей составляют мышевидные грызуны, на которых паразитируют иксодовые клещи — переносчики энцефалита и болезни Лайма. Увеличение численности популяции змей способствует снижению численности мышевидных, препятствует распространению заболеваний.

Предки всех сухопутных позвоночных: лягушки, жабы, тритоны, змеи, ящерицы, полозы, черепахи и крокодилы —

в большей степени, чем остальные виды, подверглись антропогенному влиянию и почти повсеместно охраняются. Сокращение мест их обитания отрицательно сказывается на численности популяций и видовом разнообразии. Наличие этих представителей в природной среде можно рассматривать в качестве индикатора относительного экологического благополучия. По данным американских исследователей, полициклические ароматические углеводы (ПАУ), попадающие в водоемы с нефтью, у хвостатых амфибий (*Ambystoma tigrinum*) вызывают на коже новообразования и цисты. В районе г. Северска Томской области морфологические уродства у сеголеток остромордой лягушки достигают 34—46 %. Наиболее выраженные аномалии в развитии амфибий отмечались в районе водного сброса радиохимических отходов в реку: необычная пигментация кожных покровов ~ 2 %; врожденные уродства конечностей — отсутствие части или всей передней и задней конечности ~ 4 %; повышенная васкуляризация кожи, выражающаяся в расширении капилляров и мелких сосудов, множественных кровоизлияниях под эпидермисом и т. д., ~ 45 %.

В качестве одного из эмбриотропных биотестов использовалась икра амфибий: в зависимости от стадии ее созревания по количеству отклонений и уродств оценивалась степень антропогенного влияния на популяцию. Анализ поведения рептилий проводили для прогнозирования стихийных бедствий: оползней, наводнений, землетрясений. В исследованиях китайских и казахстанских ученых собран большой материал по миграциям рептилий, нарушению зимней спячки и другим изменениям в поведении животных в периоды, предшествующие землетрясениям.

Птицы. По отношению к местообитанию птицы консервативны. Каждый вид и подвид занимает определенный район. Гнездование птиц ежегодно

происходит на одном и том же участке — гнездовой территории. Перелетные птицы, как правило, возвращаются к месту своего гнездования.

Естественно, что особенности гнездовой экологии птиц широко используются в качестве индикатора экологического состояния района. Наряду с изучением естественных кладок орнитологи используют искусственные гнездовья — скворечники со съемными крышками, чтобы регулярно вести наблюдения за величиной кладки яиц, числом вылупившихся птенцов, их развитием, питанием и сроками вылета. В скворечниках поселяются скворцы, воробьи и другие птицы: синицы, горихвостки, поползни, мухоловки. Скворечники позволяют осуществлять контролируемый полевой эксперимент: их можно установить в необходимом для статистической обработки количестве на территориях, которые интересуют эколога. Метод может быть рекомендован для экологического мониторинга. В многолетних исследованиях под ЛЭП-500, установлено отрицательное влияние переменного электрического поля на заселяемость скворечников, рост и развитие птенцов. Известны факты, когда под действием ДДТ происходит истончение скорлупы яиц многих хищных птиц: орлана белохвоста, бурого пеликана. В колонии бурого пеликана массовая гибель яиц произошла из-за их тонкой скорлупы — они были раздавлены птицами, сидящими в гнезде.

Для большинства птиц характерны весенне-осенние миграционные перелеты. Последние десятилетия миграциям птиц посвящены многочисленные исследования орнитологов. Сокращение мест гнездования птиц, изменение климатических условий, загрязнение среды обитания нарушило древние пути миграции птиц и используется в качестве биологических индикаторов глобального экологического нарушения биосферы. Кочевки, миграции, большие гнездовые и кормовые

территории позволяют считать птичье население космополитами биосферы, способными накапливать вредные антропогенные воздействия в широком пространственном ареале. Миграционные пути птиц довольно хорошо изучены и продолжают интенсивно исследоваться. Гнездовые территории птиц и их численность несложно определять на учетных маршрутах.

Популяции птиц использовались в качестве первых биоиндикаторов токсического действия пестицидов. Наиболее чувствительными к вредному влиянию техногенных факторов, по мнению ведущих орнитологов, являются эмбриональный и постэмбриональный периоды выкармливания птенцов.

Максимальный отход птенцов скворцов наблюдался под ЛЭП-500 на шестой день после их появления. Аналогичный критический период для крякв при действии токсикантов установлен американскими исследователями. Необходимо отметить, что численность популяции птиц, как правило, характеризует комплексное влияние антропогенных факторов. Практически все нарушенные места обитания птиц характеризуются увеличением численности врановых. В этом отношении ворон можно считать индикаторами комплексного загрязнения и антропогенной трансформации среды обитания.

Млекопитающие. Учет крупных и средних млекопитающих в качестве биоиндикаторов осложняется охотничьим и браконьерским промыслом. В то же время численность и видовое разнообразие крупных млекопитающих — хороший показатель не нарушенных антропогенным воздействием природных биоценозов. При количественном учете лосей, оленей, косуль широко используется авиация. Более детальную картину численности, видового разнообразия и территориального распределения представляют регулярные учеты по следам на снежном покрове, звериным тропам, лежкам и норам.

Наблюдались изменения миграционных путей лосей и северного оленя, обусловленные строительством нефтепроводов и газопроводов. Остановка и закрытие нерентабельных предприятий Кемеровской области, сбрасывающих токсические отходы в реки, способствовали увеличению численности бобров.

Наиболее информативными с точки зрения оценки загрязненности природных территорий представляются популяции мышевидных грызунов: бурозубки, полевки, мыши, крысы. Мышевидные характеризуются высокой пластичностью, они территориальны, обладают высокой способностью к размножению и распространены повсеместно. Относительные учеты численности мышевидных можно проводить в течение всего года: зимой — по количеству следов и отдушин; весной — по числу кормовых столиков, туалетов, нор; летом — по количеству попадаемости их в живоловушки или ловчие канавки. В благоприятных в экологическом отношении условиях увеличивались видовое разнообразие, численность, количество самок, количество детенышей в помете мышевидных грызунов. В неблагоприятных условиях значительно сокращалось видовое разнообразие полевок, оставались наиболее устойчивые виды.

При хронических токсических загрязнениях верхнего почвенного горизонта хорошим индикатором является численность популяции кротов, которые живут до 7 лет и питаются почвенными беспозвоночными, аккумулируя токсические компоненты. Биоиндикатором загрязнений верхних ярусов биоценоза служит учет популяций летучих мышей, живущих 7—10 лет. Снижение общего уровня загазованности в Кемеровской области соответствовало увеличению встречаемости в сумерках летучих мышей.

Для оценки последствий антропогенного влияния на популяции видов млекопитающих необходимо выявить основные направления в развитии данного процесса.

Следует использовать такие биологические показатели, как численность особей вида, размеры ареала каждого вида, тип пространственной и временной структуры ареала, размеры животных, продолжительность жизни, плодовитость, смертность, сроки размножения, характер поведения, питание, состав и качество потребляемых кормов, особенности пространственной структуры популяции, половой, возрастной спектр, характер использования территории.

1.7. Биоценотический уровень биоиндикации

Значительные изменения условий среды приводят к изменению структуры биоценозов, один тип биоценоза сменяется другим. Такой процесс носит название сукцессии. Наиболее исследованы восстановительные сукцессии, вызванные нарушением или уничтожением основного природного биогеоценоза в результате пожара, лавины или деятельности человека. Как правило, современные биоценозы в результате антропогенной деятельности в 70 % случаев находятся на той или иной восстановительной стадии сукцессии. В случае уничтожения кедрового биоценоза происходит активное развитие разнотравья, сменяющегося кустарниковой растительностью, березой, осиной, сосной, пихтой, елью и только на последнем этапе — кедром. Весь процесс занимает от 200 до 500 лет. Так, российское березовое ожерелье — наглядный биоиндикатор разрушенных человеком коренных природных биогеоценозов. Сукцессионные ряды построены для многих типов биоценозов, что позволило на основании их видовой идентификации определять этапы восстановления различного вида экосистем.

В этом отношении большой интерес представляют исследования регрессионной сукцессии, когда при

воздействии антропогенных факторов происходит последовательная деградация биоценозов. Наблюдения показывают, что такие изменения носят лавинообразный характер с промежуточными стадиями относительной устойчивости в короткие промежутки времени при незначительных, с точки зрения современного человека, антропогенных изменениях среды. В качестве примера можно рассмотреть деградацию второго по величине после Байкала озера Балхаш.

С древних времен на территории степей и полупустыни находилось уникальное озеро Балхаш. Озеро среди барханов является жемчужиной Казахстана. Две реки с горных отрогов Тянь-Шаня несли свои воды в Балхаш — Или и Каратал. Несмотря на свою относительно небольшую глубину (15—20 м), за многие тысячелетия озеро сформировало уникальную устойчивую экосистему. В самом озере в изобилии водились сазан, осман, маринка, окунь. Камыши и плавни вокруг озера служили надежным укрытием для многочисленных птиц: уток, чаек, пеликанов, цапель, фазанов. Весенние перелеты утиных закрывали солнце, словно тучей. На побережье водились лисы, волки, тигры, кабаны. Успешно акклиматизированная ондатра давала в казну ежегодно до сотни тысяч шкурок. Казалось, ничто в мире не способно нарушить идеальное состояние уникального оазиса среди пустыни.

В начале XX в. в Прибалхашье обнаружили залежи меди, построили один из самых крупных горно-металлургических комбинатов, отходы которого, включающие практически всю таблицу Менделеева, с повышенной концентрацией тяжелых металлов без очистки по каналу шириной 10 м и глубиной 1,5 м сплошным потоком ежедневно сбрасывались в озеро. Одну из впадающих в озеро рек перегородили плотиной с целью создания вблизи г. Алма-Ата (Алматы) Капчагайского водохранилища. На южном берегу озера начали заниматься рисоводством. Для борьбы

с сорняками использовали большое количество пестицидов, которые распылялись с самолета и стекали в озеро. В результате ихтиологических разработок местных ученых в озеро запускали новые виды рыб: судак, жерех, сом, осетр, лещ, елец. Стремление к интенсификации животноводства в Прибалхашье привело к необходимости весенних и осенних палов многолетнего камыша прибрежной зоны. В результате таких пожаров гибло большое количество птиц и животных. Выживших птенцов уток и ондатру уничтожали сомы, популяция которых быстро выросла, но впоследствии снизилась, оставаясь на стационарном уровне.

Можно выделить следующие этапы деградации озера, проходившие с 1960 по 1980 г. в результате антропогенной деятельности: 1) загрязнение озера отходами медеплавильного комбината, пестицидами, что приводило к заражению, гибели рыбы и водоплавающей птицы.; 2) заселение хищными породами рыб, обусловившее исчезновение эндемиков озера османа, маринки, окуня и значительное сокращение популяций сазана; 3) последующее сокращение рыбных запасов, размножение сорной рыбы ельца и леща и сохранение соответствующей кормовой базы с невысокой численностью жереха и сома.

В результате снижения уровня воды на 2—3 м и обмеления огромных площадей произошло интенсивное размножение синезеленых водорослей, заболачивание прибрежной зоны, что стало причиной исчезновения нерестилищ и усиления процессов деградации озера. В настоящее время озеро Балхаш поделилось на две части: южную, в которую впадает река, более чистую, способную к восстановлению, и северную. Характерно, что экологическая катастрофа озера совпала с закрытием рыбозавода, прекращением разведения риса, и Капчагайское водохранилище оказалось никому не нужным.

В отношении биоиндикации степени нарушения экосистем может быть довольно широко использовано правило А. Тинемана: «Чем больше отклонения от оптимума, тем меньше видовое разнообразие, но относительно большее количество оставшихся видов». Дифференцированный анализ позволил предложить следующую последовательность деградации экосистем:

- 1) исчезновение или уменьшение узкоспециализированных видов, характерных для коренных, сформировавшихся биоценозов;
- 2) смена доминирующих видов;
- 3) упрощение трофической структуры, снижение видового разнообразия экосистем;
- 4) повышение численности или интродукция видов, устойчивых к характеру разрушающего биоценоз воздействия;
- 5) элиминация или снижение численности долгоживущих видов и замена их короткоживущими быстроразмножающимися видами;
- 6) скачкообразное изменение типа биоценоза, перерождение его в другой, более примитивный, но устойчивый к воздействиям тип.

Чем глубже нарушена структура биоценоза, тем на более ранних стадиях сукцессии формируются устойчивые экосистемы.

Снижение первичной продукции водных экосистем наблюдалось при загрязнении хлорорганическими соединениями. При повышении концентрации ДДТ в пресной воде интенсивность фотосинтеза фитопланктона снижалась на 20—50 %. Замедление фотосинтеза на 25—50 % у пресноводных водорослей отмечалось при содержании $PbCl_2$ в концентрации 10 мг/л.

Методика спорово-пыльцевого анализа позволяет определить типы биоценозов в течение тысяч лет и анализировать внешние влияния в историческом аспекте.

Одним из наиболее перспективных биоиндикационных методов динамической оценки аэрозольных загрязнений является разработанный в 1970-е гг. Ю. А. Львовым метод послыйного годового анализа торфяной залежи мхов *Sphagnum fuscum*. Метод позволяет определять вид и степень аэрозольных загрязнений. Проведенные исследования динамики изменения содержания железа, кобальта, скандия по аэрозолям торфяника вблизи г. Томска с начала XX в. хорошо коррелируют как с развитием промышленности, так и с динамикой основных форм раковых заболеваний жителей города.

1.8. Ландшафтный уровень индикации

Элементарной ландшафтной единицей является экотоп, который включает физиотоп, биотоп и форму землепользования. В свою очередь физиотоп включает морфотоп, педотоп, гидротоп и климатотоп. Биотоп состоит из фитотопа и зоотопа, которые являются биологическими индикаторами.

Тип растительности, связанный с соответствующей формой местообитания, характеризует вид ландшафта. Для описания ландшафта в зависимости от поставленных задач используются ландшафтные карты разной размерности. С целью оценки степени антропогенных изменений ландшафта проводят сравнительный анализ современных карт с картами, составленными на основании архивных данных. Сравнение позволяет моделировать естественную растительность, что дает возможность оценить вероятность выживания коренных биоценозов, потенциальное и реальное видовое разнообразие, направление рекультивационных работ по сохранению природных биоценозов. Основой ландшафтного картирования является космическая и аэрофотосъемка, которая дополняется во время маршрутных исследований, состоящих в уточнении

микрорельефа, типа растительности, размера биоценозов, местообитаний видов растений и животных, занесенных в Красную книгу, и т. д. Подробная ландшафтная карта является основой любой проектной деятельности государственных и коммерческих организаций при использовании природных территорий. Аналогичная карта используется при кадастре сельскохозяйственных земель.

Тип растительности, область ее распространения в динамике позволяют судить о скорости сукцессионных процессов и степени влияния антропогенных факторов, приводящих к деградации биоценозов: опустыниванию, сокращению ареалов лиственных лесов.

Современное потепление климата, обусловленное 500-летним повышением средней годовой температуры и усиливающееся в результате парникового эффекта, вызвало подтаивание криолитозоны — зоны вечной мерзлоты. Ледники во всем мире отступают, что, вероятно, продолжится до 2300—2400 гг. Подтаивание языков криолитозоны в Сибири и Северной Америке приводит к увеличению количества болот и озер, изменению рельефа местности, созданию критических ситуаций в процессе пространственного размещения инфраструктуры газовой и нефтяной отрасли.

Использование ландшафтной индикации, основанной на оценке степени замещения северных растительных сообществ биоценозами умеренной зоны, позволяет оценить скорость отступления криолитозоны, масштабность происходящих изменений и возможный экономический урон при последующей трансформации рельефа местности. По прогнозам, активный процесс подтаивания южной границы вечной мерзлоты будет развиваться в ближайшие 50—100 лет, и современная растительная структура Западной Сибири начала трансформироваться.

Самым вариабельным, чутко реагирующим на изменение устойчивости биосферы является климат. Современные изменения климата: тайфуны, наводнения, снегопады в южных районах, потепления в северных районах — указывают на нестабильность в биосфере как результат отрицательного влияния антропогенных факторов.

Трудно переоценить значение интегральных показателей экологических систем, усредненных в пространственно-временных масштабах. Дистанционные методы космического спектрального анализа позволяют проводить интегральную оценку экологического состояния природных ресурсов в масштабе всей планеты. Еще в 1970-е гг. советские спутники передавали изображения, позволяющие с высокой степенью точности оценивать пастбищные ресурсы Средней Азии. Зависимость между биомассой и коэффициентом спектральной яркости наиболее выражена в диапазоне 0,59—0,68 мкм. В области 0,28—14 мкм можно определять физиологическое состояние растительности: болезни, стадии вегетации. Гумусность почвы достаточно хорошо коррелирует со спектральной яркостью в видимом диапазоне, что позволяет проводить в большом масштабе картирование почв в зависимости от их типа, засоленности, влажности, степени эрозийности. В диапазоне длин волн 0,7—1,1 мкм можно наблюдать за состоянием водохранилищ и природных водных объектов по положению береговых границ и уровню воды. В области 0,52—0,57 и 0,41—0,48 мкм можно оценивать развитие эвтрофикации, загрязнение водной поверхности нефтью, взвешенными частицами и поверхностно-активными промышленными отходами. Хорошо прослеживаются и антропогенные шлейфы аэрозолей, распространяющиеся на сотни и тысячи километров. Следовательно, вся совокупность антропогенных загрязнений на планете приводит к изменению альбедо, т. е. интегральной

спектральной яркости, что позволяет оценивать уровень антропогенного влияния на биосферу.

1.9. Этапы адаптации биосистем

Рассмотрим закономерности в развитии адаптивных реакций биосистем. Если уровень воздействующего фактора не превышает адаптационные возможности организма, популяции и экосистемы, то реакция биосистемы, как правило, носит специфический характер. Можно выделить биоиндикаторы — указатели, которые специфично реагируют на интересующий нас антропогенный фактор. Используя нормированные биотесты или группу биотестов, можно оценивать уровень конкретного вида загрязнений.

Когда уровень действующего фактора превышает адаптивные возможности биосистем, развивается неспецифические реакции деградации. Формируются устойчивые к воздействиям сообщества. Этапы трансформации биосистем зависят от уровня антропогенных влияний и могут служить индикаторами нагрузки на биосистемы.

В концепции биоиндикационного мониторинга можно выделить основные системы тестов, позволяющие судить о деградации сообществ и их восстановлении. Первая группа тестов представлена видами-указателями, дифференцированно чувствительными к различным типам антропогенных загрязнений, активно реагирующими снижением численности и видового разнообразия или временным значительным повышением в зависимости от особенностей действующих факторов. Динамика видового разнообразия сообществ-указателей позволяет качественно оценить степень влияния загрязнений на экосистему.

Вторая группа тестов — это виды, которые устойчивы к загрязнениям. При сокращении видового разнообразия

сообщества сохраняют относительно высокий уровень численности и позволяют оценить степень деградации биоценозов.

К третьей группе биоиндикаторов относятся восстановители, повышение количества видов и численности которых характеризует восстановительные процессы и отражает интенсивность сукцессии экосистем. Видовое разнообразие и численность сообществ восстановителей позволяет прогнозировать скорость возрождения биоценозов после антропогенных загрязнений и экологических кризисов.

Известно, что биотестирование факторов является первым шагом в создании экологической системы оценки и прогноза состояния природной среды. Выживаемость крупных млекопитающих, птиц, земноводных, пресмыкающихся, ценных в промысловом отношении рыб и других животных определяется степенью влияния на них антропогенных факторов. Углубление экологического кризиса как в глобальном, так и в региональном масштабах неизбежно будет оказывать влияние на компоненты биосферы. Отсутствие достаточного количества данных и концептуального представления об экологической роли техногенных изменений естественной среды приведет к непредсказуемым катастрофическим изменениям в биосфере.

С целью оценки возможных последствий необходимо создание дифференцированной шкалы биоиндикаторов в зависимости от уровня организации биосистем. Следует на качественном и количественном уровне проводить интегральную оценку загрязнений различного типа биоценозов, что позволит ранжировать их по степени устойчивости к антропогенным влияниям. На основании выявленных изменений можно остановить лавинообразный процесс деградации экосистем.

Современный этап оценки экологического состояния природной среды характеризуется все более выраженной тенденцией к созданию комплексных систем экологического мониторинга и разработке концепций биопрогнозирования. Комплексная система физико-химических датчиков контроля состояния окружающей среды и необходимый набор биоиндикационных тестов, функционирующих в реальном масштабе времени, позволят создать основу для последующего экологического прогнозирования. Экологический прогноз может иметь качественную и количественную форму.

В основе количественного прогноза лежат различные математические методы оценки поступающих данных с последующей качественной интерпретацией. В то же время вся совокупность данных экологического мониторинга может быть довольно широко использована при оптимизации хозяйственной деятельности человека, обосновании стоимости природных ресурсов и оценке реальной способности природной среды к восстановлению.

Представляется целесообразным расширение и углубление научных исследований по биоиндикации антропогенных загрязнений.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие существуют уровни организации биосистем?
2. Каковы механизмы адаптации организмов?
3. Каким образом используются микроорганизмы и вирусы в качестве биоиндикаторов загрязнений среды?
4. Какова чувствительность органов и тканей к техногенным загрязнениям?
5. Перечислите биоиндикационные методы анализа физиологических систем.
6. Как осуществляется биоиндикация загрязнений с использованием особенностей строения паутины?

7. Расскажите об индивидуальном и видовом уровнях адаптации?

8. Назовите критические периоды развития в онтогенезе биосистем.

9. Каким образом используют насекомых как биоиндикаторы загрязнений?

10. Назовите особенности использования рыб при биоиндикации.

11. Какие используются методы биоиндикации с помощью млекопитающих?

12. Какие используются методы биоиндикации с помощью птиц?

13. Расскажите о сукцессии как интегральном процессе состояния биоценозов.

14. Сформулируйте правило А. Тинемана.

15. Что такое ландшафтный уровень биоиндикации?

16. Перечислите виды указателей.

17. Что такое биопрогнозирование?

18. Какие сообщества устойчивы к влиянию факторов?

Глава 2. Биоиндикация нефтезагрязнений

2.1. Дождевые черви — биоиндикаторы нефтезагрязнений

Развитие нефтегазодобывающей отрасли Западной Сибири привело к хроническому загрязнению природной среды нефтью, нефтепродуктами, минерализованными сеноманскими растворами и шламовыми отходами¹.

Использование биоиндикационных методов позволило оценить степень загрязненности и уровень деградации экосистем. Беспозвоночные животные формируют первичную трофическую цепь консументов и характеризуют экологическое состояние почвенных и водных экосистем. Сообщества распространенных родов беспозвоночных заселяют почвы и водоемы, что позволяет проводить сравнительный анализ негативного влияния нефтезагрязнений на различные экосистемы.

Повсеместное распространение почвенных беспозвоночных позволяет рассматривать их в качестве биоиндикаторов состояния почв и водных экосистем в широком диапазоне действий естественных и антропогенных факторов. Почвенные беспозвоночные, являясь составными компонентами почвенных экосистем, отражают негативные изменения при нефтезагрязнениях и используются в качестве биоиндикаторов².

Дождевые черви — земляные черви, наиболее известная группа почвенных животных. Численность их во всех влажных биотопах умеренной полосы высокая, по

¹ *Карташев А. Г.* Экологические аспекты нефтедобывающей отрасли Западной Сибири. Томск: Изд-во ТУСУР, 2007.

² *Карташев А. Г.* Биоиндикация антропогенных загрязнений. Томск: Изд. ТУСУР, 2019.

биомассе они занимают одно из первых мест. Дождевые черви относятся к типу кольчатых червей (*Annelida*), открывающих в системе животных высший уровень организации. Малощетинковые черви — обитатели пресных вод и почвы, единично встречаются в морях. Известно более 5000 видов. Отличительными особенностями внешнего строения малощетинковых червей являются сегментация тела, отсутствие параподий, наличие железистого пояса в передней трети тела у половозрелых особей. По бокам тела расположены щетинки, обычно по четыре пары пучков на каждом сегменте. Такое упрощение внешнего строения связано с адаптацией к роющему образу жизни. В фауне Палеарктики, к которой целиком относится территория бывшего СССР, насчитывается около 220 видов, в России около 100 видов дождевых червей, 11 из которых занесены в Красную книгу СССР. На территории России дождевые черви представлены главным образом видами семейства люмбрицид (*Lumbricidae Claus*). Выделяются еще четыре семейства, распространенные на территории России: *Moniligastridae Claus*, *Criodrilidae Vejdovsky*, *Ocnerodrilidae Beddard*, *Megascolecidae Michaelsen*. Состав семейств насчитывает шесть видов. Преимущественно крупные виды входят в группу «макрофауна». Люмбрициды составляют три экологические группы: поверхностно живущие — подстилочные, почвенно-подстилочные и норники, прокладывающие глубокие ходы, которые они редко покидают.

Виды двух последних групп взаимно заменяют друг друга в зональных почвах: почвенно-подстилочные заходят далеко на север, населяя заболоченные почвы тайги, норники обитают в районах со средиземноморским климатом. К подстилочным видам можно отнести, например, *Dendrobaena octaedra S.*, *Lumbricus castaneus S.*, *Allolobophora eiseni L.* Они наиболее мелкие, размеры не

превышают 6,5 см. Известны виды длиной 2—3 см и толщиной около 1 мм. Обитатель гумусового горизонта *Lumbricus rubellus* H. крупнее — до 13 см, норники, например *Lumbricus terrestris* L., достигают 25 см и более, самые крупные дождевые черви в почвах России встречаются в горных районах: на Алтае и в Крыму. Самый распространенный вид — *Nicodrilus caliginosus* S. обычно живет в распаханых почвах, народное название — пашенный червь, серой окраски, длиной около 15 см. Червь редко выползает на поверхность почвы, живет на глубине 10—15 см, питается перегнившими остатками корней и гумусом. В сухую погоду мигрирует глубже, до полуметра и более, строит капсулу и временно впадает в спячку. В благоприятные периоды численность червей достигает 400—500 экз./м².

Для навозных и компостных куч характерен еще один вид земляных червей — *Eisenia foetida* S. Отличается яркой красной окраской в виде полосок и неприятным запахом. Вид характеризуется коротким циклом развития и размножается в кучах компоста и в парниках почти круглый год. Численность достигает 1000 особей и более на 1 м² при средних размерах 8 см в длину. Численность дождевых червей в почве лугов значительно выше, чем в лесу, но в основном за счет поверхностно обитающих видов. В значительном количестве лямбрициды встречаются только под луговой растительностью, здесь преобладают поверхностно обитающие формы.

Почвенные черви, кроме *O. lacteum* O., представлены в почве лугов и другими видами. Дождевые черви представлены почти исключительно поверхностными формами, из которых преобладают подстилочный вид *D. octaedra* S. и *E. nordenskioldi* E. Из почвенных видов обычен только *O. lacteum* O., способный переносить сильное переувлажнение жесткими грунтовыми водами.

Для оценки реакций червей исследовались поведенческие реакции и изменение численности дождевых червей в зависимости от концентрации и длительности влияния нефти и нефтепродуктов. В лабораторных условиях изучались поведенческие реакции и изменения численности дождевых червей *Lumbricus rubellus* H. под влиянием различных концентраций товарной нефти и нефтепродуктов: бензина А-80, дизельного топлива летнего типа.

Для оценки влияния нефти, бензина и дизельного топлива на поведение и выживаемость дождевых червей использовались специально изготовленные лабораторные кюветы из оргстекла с размерами: длина — 0,4 м; высота — 0,15 м; ширина — 0,02 м. Размеры лабораторных кювет обусловлены характером распределения дождевых червей по профилю почвы. Известно, что основное количество животных сосредоточено в поверхностном 10—20-сантиметровом слое почвы. В лабораторные кюветы помещалась усредненная проба гумусового слоя серых лесных почв зернисто-комковатой структуры влажностью 30 % по 1 кг 14-сантиметрового слоя почвы в каждой кювете. Аналогичный тип почв широко распространен в Западной Сибири. В каждую кювету заселялось по 10 дождевых червей *Lumbricus rubellus* H. Опыты проводились при комнатной температуре. В экспериментах использовалось 850 половозрелых особей дождевых червей.

С каждым видом загрязнения проводились два варианта опытов. В первом варианте проводились опыты с полным поверхностным загрязнением почвенного субстрата нефтепродуктами. Во втором варианте использовалось частичное загрязнение почвенного субстрата нефтепродуктами. Каждая серия состояла из восьми опытов с одноразовым внесением загрязнителей в концентрациях 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 г/кг почвы при параллельном контроле. Товарную нефть вносили в кюветы через 1 сутки

после помещения в нее червей. Эксперименты проводились в течение 7 суток для каждой концентрации нефти. Использовалась товарная нефть Урманского месторождения.

Опыты с полным загрязнением бензином проводились по аналогичной методике: в лабораторные кюветы с почвой и червями добавляли бензин А-80. Эксперимент состоял из шести опытов с исходными концентрациями 2,5; 5; 7,5; 10; 20 г/ кг почвы при параллельном контроле. Опыты проводились в течение 7 суток для каждой концентрации. В лабораторных и полевых исследованиях использовался бензин автомобильный А-80. Эксперимент с полным загрязнением дизельным топливом летнего типа состоял из шести серий при концентрациях 2,5; 5; 7,5; 10, 20 г/кг почвы при параллельном контроле. Дизельное топливо вносилось сверху из мерного стакана так, чтобы оно просачивалось по почвенному профилю равномерно на одинаковую глубину. Опыты проводились в течение 7 суток для каждой исследуемой концентрации.

Опыты с частичным загрязнением почвы нефтепродуктами проводились по следующей схеме: в лабораторные кюветы с почвой и червями вносились нефтепродукты равномерно на всю глубину слоя почвы. Эксперимент состоял из восьми вариантов для каждого вида нефтепродуктов с сегментами загрязнения шириной 1, 2, 4, 8, 16, 32, 40 см при параллельном контроле.

Поведенческие реакции опытной группы червей наблюдались визуально. Прозрачные пластиковые кюветы шириной 2 см позволяли наблюдать за поведением каждого экземпляра. При внесении товарной нефти в концентрации 100, 50, 40, 30, 20, 10 и 5 г/кг почвы при сплошном загрязнении почвенного профиля дождевые черви начинали реагировать в течение первых 10—15 мин. Конструкция лабораторных кювет

позволила оценить глубину проникновения нефти в сосудах.

Совокупность наблюдаемых поведенческих реакций дождевых червей представлена следующими типами. Поведение не изменялось при нефтезагрязнениях у 15 % животных. В основном это были беспозвоночные, которые находились на дне экспериментальных садков или в придонной части. Второй тип поведения проявился у 60 % дождевых червей: они поднимались до границы просачивания нефти, начинали двигаться вдоль нее, демонстрируя негативную ответную реакцию на загрязнение в поисках чистой почвы. Третий тип: дождевые черви проходили слой почвы, загрязненный сырой нефтью, перпендикулярно границе просачивания и выходили на поверхность (25 %). Наиболее оптимальной поведенческой реакцией червей для выживания является второй тип горизонтальной миграции, в то время как при вертикальной миграции животных происходила их гибель. Необходимо отметить особенности поведения дождевых червей 3-й группы — сокращение кожно-мускульного мешка, асинхронные движения переднего и заднего отделов.

Анализ среднестатистических данных выживаемости червей при полном покрытии почвы нефтью свидетельствует о летальности животных при концентрации нефти 20–50 г/кг в первые двое суток с последующим увеличением в третьи сутки. Наблюдается пропорциональная зависимость летальности червей от концентрации нефтезагрязнений. Летальная доза нефти формировалась при концентрации 100 г/кг. В контроле численность дождевых червей оставалась без изменений в течение 7 дней. Животные вели себя спокойно. Резких изменений в поведении червей во время опыта не наблюдалось. Их ходы располагались в горизонтальном и в вертикальном направлениях. Выхода

дождевых червей на поверхность почвы в течение опыта не наблюдалось.

Эксперименты с локальным нефтезагрязнением проводились при внесении нефти в лабораторные кюветы сегментарно: длиной 1, 2, 4, 8, 16, 32 и 40 см и шириной 2 см. При частичном загрязнении почвенного профиля нефтью по реакции дождевых червей в течение первых 5—10 мин после внесения нефти условно разделялись на три группы. Первая группа — поведенческие реакции дождевых червей не изменялись. К данной группе были отнесены черви, которые не попали под непосредственное воздействие нефти. Вторая группа — уход дождевых червей на некоторое расстояние от загрязнения. Реакция была свойственна червям, находившимся на границе с загрязнением либо в непосредственной близости от нее. Черви не пытались выйти наружу, они уходили в сторону от загрязнения на определенное расстояние. Третья группа — дождевые черви проходили слой почвы, загрязненный сырой нефтью. При нефтезагрязнениях поверхности, не превышающей 64 %, животные способны к миграции, при нефтезагрязнениях в пределах 80 % наблюдается их гибель. Изменение численности дождевых червей в лабораторных кюветах происходило в течение 4 суток. Смертность дождевых червей *Lumbricus rubellus* H. в зависимости от размеров локальных загрязнений нефтью по почвенному профилю была максимальной при загрязненности поверхности нефтью, равной 80 %.

При внесении бензина А-80 и дизельного топлива с концентрацией 2,5; 5; 7,5; 10; 20 г/кг почвы при сплошном загрязнении почвенного профиля дождевые черви *Lumbricus rubellus* H. начинали реагировать в течение первых 15 мин. Все животные по характеру поведенческих реакций на нефтепродукты разделились на три группы. У первой группы поведенческие реакции остались без изменения и животные погибли. Количество червей,

отнесенных к данной группе, составило в среднем 89 %. Во второй группе дождевые черви, проявляя ответную реакцию на загрязнение, начинали двигаться в горизонтальном направлении в поисках чистой почвы. Количество червей, отнесенных к данной группе, составило в среднем 10 %. В третьей группе дождевые черви проходили слой почвы, загрязненный бензином и дизельным топливом, перпендикулярно границе просачивания и выходили на поверхность (1 %). Такие реакции характерны для дождевых червей *Lumbricus rubellus* H., которые находились в верхнем слое почвы до 3 см и в первые минуты реагировали на внесенные нефтепродукты.

Негативное экологическое влияние бензина и дизельного топлива заключается не столько в изменении свойств почвы, сколько в химической токсичности. Ароматические углеводороды, находясь в почвах, оказывают наркотическое и токсическое действие на живые организмы, что подтверждается первым типом поведенческих реакций дождевых червей *Lumbricus rubellus* H. В течение короткого периода острого токсичного действия вследствие высокой летучести ароматических углеводородов бензин и дизельное топливо оказывали значительное отрицательное влияние на численность дождевых червей.

Проведенные лабораторные исследования показали, что 10 % дождевых червей способны реагировать на загрязнение и горизонтально мигрировать в чистую почву. Стабилизация численности дождевых червей *Lumbricus rubellus* на третьи сутки опытов обусловлена тем, что значительная часть бензина и дизельного топлива улетучивалась. Необходимо отметить особенности поведения дождевых червей 3-й группы, которые выходили непосредственно на поверхность. Животные не передвигались по загрязненной нефтепродуктами поверхности, у них отсутствовало сокращение кожно-

мышечного мешка, они не возвращались в почву и погибали.

Среднестатистические данные по смертности дождевых червей *Lumbricus rubellus* H. в зависимости от концентрации бензина А-80 и дизельного топлива свидетельствуют о негативном влиянии нефтепродуктов на выживаемость червей. Токсичность нефтепродуктов в 8—10 раз превышала токсичность нефти, отличалась быстродействием и приводила к дискоординации поведенческих реакций животных.

При локальном загрязнении почвенного профиля бензином А-80 и дизельным топливом реакция дождевых червей в течение первых 5—10 мин после внесения нефтепродуктов существенно зависела от местоположения животных.

Сравнительный анализ данных, полученных в лабораторных опытах при загрязнении почвы нефтью (50, 100 г/кг почвы), дизельным топливом и бензином при концентрации 10, 20 г/кг почвы, выявил, что основная масса дождевых червей погибает в первые дни после загрязнения. Анализируя данные по смертности червей в зависимости от концентрации бензина А-80 и дизельного топлива при сплошном загрязнении почвенного профиля в первый день после их внесения, можно заключить, что бензин оказывает более выраженное влияние, чем дизельное топливо.

В относительно короткий период острого токсического действия, благодаря высокой летучести ароматических углеводородов, бензин и дизельное топливо способны оказать значительное влияние на выживаемость дождевых червей. Полулетальная доза (LD_{50}) бензина в условиях сплошного загрязнения почвы сохранялась при 4 г/кг. В условиях сплошного загрязнения почвенного профиля дизельным топливом LD_{50} достигалась при 4,9 г/кг. Ароматические углеводороды с почвенным воздухом через кожные покровы попадали в организм животных, вызывая

отравление. В лабораторных опытах с дождевыми червями, относящимися к двум морфоэкологическим типам: навозному (*Eisenia foetida*) и типично почвенному (*Nicodrilus caliginosus*), показано, что для них наиболее токсичны легкие фракции нефти. Более устойчивыми к нефтяному загрязнению оказались навозные черви *E. Foetida*, чувствительными — *N. caliginosus*. В экспериментах на открытых песчаных пляжах приливно-отливной зоны обнаружено, что свежая сырая нефть более токсична, чем нефть после выветривания. Живущие в подстилке черви не снижали интенсивность дыхания при очень низком для почвы содержании кислорода. Дождевые черви *L. rubellus* являются типичными поверхностно обитающими червями. Проводя аналогию с живущими в подстилке *Dendrobaena octaedra* и их чувствительностью к снижению содержания кислорода в воздухе, можно считать, что смертность дождевых червей провоцируется и снижением концентрации кислорода в почвенном профиле.

Стабилизация численности дождевых червей на четвертые сутки лабораторных опытов обусловлена тем, что значительная часть легкой фракции нефти разлагалась и улетучивалась на поверхности. В этих условиях LD₅₀ при сплошном загрязнении почвенного профиля проявлялась при 29,8 г товарной нефти на 1 кг почвы. Результаты исследований скорости и направленности процессов самоочистения почв, загрязненных нефтью, свидетельствуют о том, что несмотря на обнаруженные различия в скорости изменений отдельных классов углеводородов и фракций нефти, зависящие от почвенно-климатических условий и состава нефти, существуют общие процессы ее внутрипочвенной деградации. Во всех случаях происходило снижение содержания нефти в результате физико-химических и микробиологических

процессов ее разрушения и минерализации. С уменьшением содержания легкой фракции ее токсичность снижалась.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что нефть и нефтепродукты оказывают негативное действие на дождевых червей, вызывая их массовую элиминацию в зоне загрязнений.

В природных условиях изучалось влияние искусственного загрязнения почвы нефтью на состояние популяций дождевых червей. Параллельно оценивалась скорость деградации нефти и нефтепродуктов в почве. Для оценки влияния острой токсичности различных нефтепродуктов: бензина, дизельного топлива и нефти — на миграцию и выживаемость дождевых червей в естественном биоценозе были заложены модельные площадки по 1 м² с одноразовым внесением нефти 2,5; 5; 10; 15 кг/м², бензина А-80 — 0,5; 1; 2; 4 кг/м² и дизельного топлива — 0,5; 1; 2; 4 кг/м². В качестве контрольных площадок использовались близко расположенные участки без загрязнений. Учет численности дождевых червей на площадках проводился в 3-и, 10-е, 30-е, 90-е и 450-е сутки действия нефтезагрязнений. Отбор проб проводился на загрязненном участке, на границе загрязнений, на удалении 1 м от загрязнений и контрольных участках. Параллельно выполняли количественный учет коконов червей.

В результате исследований через 3 суток после внесения нефти, бензина А-80 и дизельного топлива в почву на всех участках, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, не наблюдалось живых дождевых червей. На участках, загрязненных бензином А-80 и дизельным топливом, обнаружены разлагающиеся черви.

При загрязнении бензином количество разлагающихся червей было максимальным при его внесении 4 кг/м² и составило 97,5 % от количества живых дождевых червей на контрольном участке, минимальным — при внесении 0,5 кг/м² и составило 58,1 %. При загрязнении почвы дизельным

топливом количество разлагающихся червей при его внесении 4 кг/ м² составило 75,4 % от количества живых дождевых червей на контрольном участке, при концентрации 0,5 кг/м — 44,3 %. На участках, загрязненных нефтью, разлагающихся дождевых червей не обнаружено, что свидетельствует об успешной миграции их из зон загрязнений. Наблюдалась пропорциональная зависимость между концентрацией вносимых нефтепродуктов и смертностью дождевых червей на загрязненных участках в первые дни после внесения нефтепродуктов.

Количество коконов дождевых червей подсчитывалось на загрязненном участке, на границе загрязнения, на удалении 1 м от загрязнения и на контрольном участке. Максимальное количество коконов обнаружено на границе с участком загрязнения бензином 2,0 кг/м и составило 475 экземпляров, минимальное — на границе с участком загрязнения бензином 4,0 кг/м и составило 173 экземпляра. На границах с участками, загрязненными бензином с концентрацией 2,0; 1,0; 0,5 кг/м, дизельным топливом — 4,0; 2,0 кг/м², нефтью — 5,0 кг/м², наблюдалось увеличение количества коконов по сравнению с загрязненным участком и участком, находящимся на удалении 1 м. При сравнении участков, загрязненных бензином и дизельным топливом, с участками, находящимися на удалении 1 м, существенных различий в количестве коконов не наблюдалось.

При сравнении контрольных участков и участков, находящихся на расстоянии 1 м от загрязненных нефтью, бензином и дизельным топливом участков, существенных различий в общем количестве живых червей не выявлено. Полученные данные позволяют заметить, что дождевые черви, подвергшиеся действию загрязнителей в первые 3 суток, уходят к границе с загрязнением и их общее количество превышает количество червей в контроле.

При сравнении контрольного участка и участков, находящихся на удалении 1 м от загрязненных нефтью,

бензином и дизельным топливом, существенных различий в количестве половозрелых и неполовозрелых червей не обнаружено. В приграничном районе с загрязненными участками значительно увеличивалось общее количество червей. Данные по максимальному и минимальному количеству половозрелых дождевых червей на границе с загрязненными участками соответствуют общему количеству живых червей.

На исследуемых участках выявлены два вида дождевых червей: *Lumbricus rubellus* H., *Octolasion lacteum* O. У дождевых червей, подвергшихся влиянию нефти и нефтепродуктов, наблюдалось снижение числа амебоцитов с нормальной формой ядер и увеличение числа амебоцитов с измененной формой ядер.

При проведении полевых работ через 10 суток после внесения нефти, бензина А-80 и дизельного топлива в почве на всех загрязненных участках живых дождевых червей не обнаружено. На участках, загрязненных бензином А-80 и дизельным топливом, обнаружены разлагающиеся черви. При загрязнении бензином количество разлагающихся червей было максимальным при его внесении 4 кг/м² и составило 143 экземпляра, минимальным — при внесении 0,5 кг/м² и составило 133 экземпляра.

При загрязнении почвы дизельным топливом количество разлагающихся червей было максимальным при его внесении 4 кг/м² и составило 50,2 %, минимальным — при внесении 0,5 кг/м² — 34 % от количества живых дождевых червей на контрольном участке. Как показали лабораторные исследования, на 4-й день дождевые черви разлагаются полностью. Наличие разлагающихся дождевых червей через 10 суток свидетельствует о том, что черви мигрировали на площадки, загрязненные бензином и дизельным топливом. Вероятно, токсическое и наркотическое влияние нефтепродуктов приводило к

нарушениям запаховой ориентации животных, что вызвало их негативную миграцию и гибель.

Во всех случаях нефтезагрязнений не отмечалось аналогичных эффектов. Дождевые черви частично заселили площадки, загрязненные бензином и дизельным топливом. На площадках, загрязненных нефтью, разлагающихся червей не обнаружено. При сравнении границ загрязненных участков с контролем отмечалось уменьшение общего количества живых червей на границе с загрязнением бензином (4,0; 2,0 кг/м²), дизельным топливом (4,0; 2,0; 1,0; 0,5 кг/м²) и нефтью (15, 10 кг/ м²). На границе с участком, загрязненным бензином, общее количество живых червей было максимально при его внесении 1 и 0,5 кг/м и составило 292 экземпляра, минимально — при внесении 2 кг/м и составило 240 экземпляров. Представленные результаты свидетельствуют о снижении численности животных на границе с участками, загрязненными нефтепродуктами.

На границе с участком, загрязненным дизельным топливом, общее количество живых червей было максимально при его внесении 0,5 кг/м², минимально при внесении 4 кг/м². На границе с участком, загрязненным нефтью, общее количество живых червей было максимально при ее внесении 2,5 кг/ м², минимально — при внесении 15 кг/м². Таким образом, на границе с участками загрязнений снижалась численность дождевых червей, что свидетельствует о миграции дождевых червей в течение определенного периода времени.

Необходимо отметить, что максимальное количество червей *Lumbricus rubellus* H. обнаружено на границе загрязненного участка при внесении дизельного топлива 0,5 кг/м² и составило 65,1 %, минимальное — при внесении нефти 15 кг/м² и составило 19,7 %. Максимальное количество червей *Octolasion lacteum* O. обнаружено на границе загрязненного участка при внесении дизельного топлива 0,5 кг/м² и составило 57,9 %. На 30-й день на

площадках, загрязненных бензином (0,5 кг/м²) и дизельным топливом (2, 1, 0,5 кг/м²), обнаружены дождевые черви двух видов. Максимальное количество червей *Lumbricus rubellus* H. обнаружено на площадке при внесении бензина 0,5 кг/м² и составило 55 %, минимальное — при внесении дизельного топлива 2 кг/м² и составило 12,8 %. Максимальное количество червей *Octolasion lacteum* O. обнаружено на площадке при внесении бензина 0,5 кг/м² и составило 31,5 %, минимальное — при внесении дизельного топлива 2 кг/м² и составило 11,1 %.

Следовательно, при относительно невысоких концентрациях бензина и дизельного топлива наблюдаются снижение токсичности нефтепродуктов и вторичное заселение загрязненных участков беспозвоночными животными. Площадки с нефтезагрязнениями заселяются беспозвоночными значительно позже.

Остаточные концентрации нефти и нефтепродуктов в почве, при которых начинается восстановление плотности популяции дождевых червей, составляют: для бензина — 70 мг/кг, дизельного топлива — 2000 мг/кг, нефти — 5000 мг/кг. Показано, что приграничная зона миграции дождевых червей в условиях загрязнения почвы нефтепродуктами не превышает 1 м. Дождевые черви *Lumbricus rubellus* H. более устойчивы к загрязнению почвы нефтепродуктами, чем *Octolasion lacteum* O. Следовательно, можно дифференцировать адаптивные реакции популяций дождевых червей при хроническом влиянии нефтезагрязнений и использовать их при биоиндикации степени загрязнений почв нефтью и нефтепродуктами.

Первый этап адаптивных изменений популяции червей характеризуется частичной гибелью и горизонтальной миграцией животных из загрязненной области.

Второй этап — миграция особей из приграничных районов.

Третий этап — постепенное заселение дождевыми червями загрязненных участков пропорционально почвообразовательным восстановительным процессам. Используя полученные зависимости, можно оценивать восстановление почвенного покрова при нефтезагрязнениях. Результаты исследований в комплексе с другими биологическими показателями применялись для оценки состояния почв в широком диапазоне загрязнений нефтью и нефтепродуктами.

2.2. Почвенные нематоды — биоиндикаторы нефтезагрязнений и минерализованных растворов

Нематоды являются необходимым компонентом биогеоценозов и вместе с простейшими представлены во всех группах почвенных животных. Почвенные нематоды активно перерабатывают растительный опад, стимулируют активность микроорганизмов и участвуют в круговороте питательных веществ. Нематоды основную часть жизненного цикла проводят в почве и подвержены влиянию почвенной среды. Загрязнение почвы негативно влияет на сообщества нематод. Почвенные нематоды рекомендованы для прогнозирования состояния почв и мониторинга изменений окружающей среды. Нематоды чувствительны к изменению среды обитания, характеризуются коротким циклом развития, не мигрируют, встречаются повсеместно. Необходимо отметить, что влияние нефти, сеноманских растворов и нефтепродуктов на сообщества почвенных нематод Западной Сибири практически не исследовалось¹.

¹ *Карташев А. Г. Калашикова С.А.* Влияние нефтезагрязнений и сеноманских растворов на сообщества почвенных нематод. М.: Горячая линия — Телеком, 2018.

В зависимости от концентрации нефти, вносимой на поверхность почвы, из сообществ нематод элиминировалось до 50 % родов. Происходила перестройка сообществ нематод с появлением нематод-колонизаторов, устойчивых к нефтезагрязнениям с коротким жизненным циклом, высокой плодовитостью и значительными колебаниями численности. Двухвершинный подъем весенне-летней динамики общей численности нематод сменялся одновершинным (рис. 2.1).

Максимальная общая численность нематод при загрязнении нефтью наблюдалась в июле. Доминирующей эколого-трофической группой в сообществах нематод являлись бактериотрофы. После элиминации 50 % родов бактериотрофов выжившие роды характеризовались высокой численностью. Вероятно, данная группа нематод питалась нефтебактериями. Следовательно, роды нематод *Acrobeloides*, *Cephalobus* могут использоваться в качестве биоиндикаторов интенсивности разложения нефти микроорганизмами. Нефтезагрязнения стимулировали повышение численности грибов, участвующих в разложении нефти, и специализирующихся нематод-микотрофов, в частности *Aphelenchus* и *Aphelenchoides*.

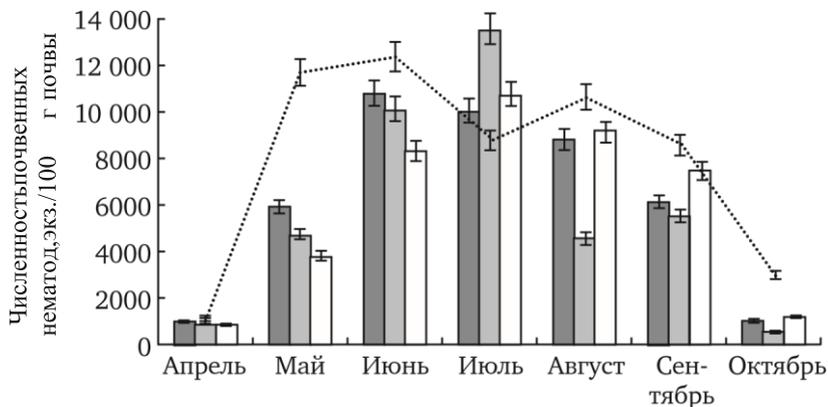


Рис. 2.1. Сезонная динамика общей численности почвенных нематод в весенне - осенний период при внесении нефти на поверхность почвы:

■ — 50 г/кг; ■ — 100 г/кг; □ — 200 г/кг; — контроль

Выделенные роды нематод рассматривались в качестве биоиндикаторов интенсивности микотрофного разложения нефти. В зависимости от устойчивости к нефтезагрязнениям построен трофический ряд, включающий нематоды, ассоциированные с растениями, микотрофы, бактериотрофы, паразиты растений, политрофы и хищники.

В Западной Сибири для поддержания пластового давления при разработке нефтяных месторождений применяются подземные минерализованные растворы сеноманского водоносного комплекса. Как показала практика, растворы полностью пригодны для постоянной и временной закачки на всех стадиях разработки нефтяных месторождений. Применение высокоминерализованных растворов предотвращает заражение сероводородом нефтяных пластов.

Основными составляющими сеноманских растворов, используемых в наших исследованиях, являлись катионы натрия и калия (10 222 мг/л), катионы кальция (517 мг/л), анионы гидрокарбоната (317 мг/л), анионы хлора (16 774 мг/л). Плотность воды при температуре 20 °С составляла в среднем 1,014 г/см³, кислотность — 5,0, общая жесткость — 393. Минерализация изменялась от 20 до 36 г/л, в среднем — 28 г/л. Содержание твердых взвешенных веществ — 250 мг/л.

Разливы высокоминерализованных растворов из сеноманских пластов, которые используются для поддержания пластового давления, опасны для окружающей среды. В результате аварий происходили засоление почв и деградация растительного покрова. Растворы с высокой скоростью впитывались в почву и распространялись на большие площади. На Васюганской группе нефтяных месторождений ОАО «Томскнефть» имеются десятки гектаров с погибшим растительным покровом в результате влияния сеноманских растворов. В результате исследований влияния

высокоминерализованных растворов с концентрацией 50, 100 и 200 г/кг в почве на сообщества почвенных нематод в естественных условиях выявлены изменения в количестве родов, трофической структуре и сезонной динамике численности.

Наблюдалась элиминация пяти родов почвенных нематод в загрязненной почве с концентрациями растворов 50 и 100 г/кг и шести родов при 200 г/кг. Отклонения от контрольных значений находились в диапазоне от 20 до 23 %. Доминирующей группой почвенных нематод по количеству таксонов, как и в контрольных участках, являлись бактериотрофы. При действии сеноманских растворов из сообщества нематод элиминировались три рода бактериотрофов: *Prismatolaimus*, *Mesorhabditis*, *Acrobeles*.

Рассматривая трофическую структуру нематод по численности в каждой эколого-трофической группе, обнаружили доминирование трех групп: бактериотрофов, нематод, ассоциированных с растениями, и микотрофов. Ассоциированные с растениями нематоды изменялись по численности без элиминации родов в зависимости от концентраций сеноманских растворов. Аналогичная ситуация была характерна и для политрофов. Элиминация одного рода нематод *Criconema*, паразитов растений, происходила при загрязнении опытного участка раствором с концентрацией 200 г/кг. Для остальных эколого-трофических групп была характерна элиминация одного рода при исследуемых концентрациях растворов.

Таким образом, устойчивость к минерализованным растворам соответствовала следующей последовательности: нематоды, ассоциированные с растениями — наиболее устойчивая группа; бактериотрофы; политрофы; паразиты растений; микотрофы и хищники.

В зависимости от концентраций сеноманских растворов из сообществ нематод элиминировались пять-шесть родов. При загрязнении поверхностного слоя почвы растворами с концентрацией 50 г/кг наблюдалось снижение общей численности нематод в июне на 12—15 %, в июле — на 42—43 %. Для загрязнений при концентрации растворов 100 г/кг характерно изменение сезонной динамики численности, двухвершинный подъем численности сменялся одновершинным с максимальными значениями в августе. В трофической структуре по численности нематод доминировали три группы: бактериотрофы, нематоды, ассоциированные с растениями, и микотрофы.

Таксономическая устойчивость почвенных нематод к сеноманским растворам представлена следующей последовательностью: нематоды, ассоциированные с растениями, бактериотрофы, микотрофы, паразиты растений, политрофы и хищники, что позволяет рекомендовать их для разработки биоиндикационных методов контроля уровня засоленности почв.

2.3. Влияние бензина на сообщества нематод

Негативное влияние на сообщества нематод в естественных условиях наблюдалось при действии бензина. Фауна почвенных нематод деградировала под действием автомобильного бензина. Внесение бензина на поверхность почвы приводило к снижению общей численности нематод. В наших исследованиях использовался автомобильный бензин с октановым числом 92, содержание свинца — не более 0,01 г/дм³, марганца — не более 18 мг/дм³, массовая доля серы — не более 0,05 %, объемная доля бензола — не более 5 %, плотность при 15 °С — от 725 до 780 кг/м³. На опытных площадках вносили следующие концентрации бензина: 50, 100 и 200 г/кг почвы.

В первый месяц после загрязнения бензином общая численность нематод сократилась на 80 % по сравнению с контролем, во второй месяц — на 83 %. При внесении различных концентраций бензина на поверхность почвы изменялся характер сезонной динамики численности почвенных нематод. Двухвершинный подъем численности нематод сменялся одновершинным. Максимальные значения общей численности почвенных нематод при загрязнении бензином наблюдались в июле. В течение периода исследования общая численность почвенных нематод снижалась.

Сравнивая полученные данные с влиянием нефти на сообщества нематод, необходимо отметить более выраженное снижение их численности при загрязнении бензином. Общая численность почвенных нематод при загрязнениях бензином снижалась относительно численности при загрязнении нефтью более чем на 50 %.

Происходило снижение таксономического разнообразия почвенных нематод в загрязненных участках. В зависимости от концентрации бензина количество таксонов снижалось от 7 до 16. Доминировали по численности нематоды *Acrobeloides*, *Chiloplacus*, *Aphelenchoides*, *Aphelenchus*, *Panagrolaimus*. В первый месяц после внесения бензина на поверхность почвы структура сообществ нематод была представлена двумя эколого-трофическими группами: бактериотрофами и микотрофами. В период исследования в сообществах восстанавливались нематоды, ассоциированные с растениями, паразиты растений и политрофы. Возможно, восстановление численности и видового разнообразия нематод связано с испарением бензина и вымыванием атмосферными осадками.

В зависимости от устойчивости к загрязнению бензином можно построить ряд выживаемости нематод: бактериотрофы, микотрофы, нематоды, ассоциированные с растениями, паразиты растений, политрофы, хищники.

Эколого-трофические группы нематод характеризуются дифференцированной устойчивостью к бензиновому загрязнению и могут использоваться при биоиндикации загрязнений.

Наиболее устойчивыми родами к загрязнению бензином являлись *Cervidellus*, *Aphelenchoides*, *Cephalobus*, *Acrobeloides*, *Chiloplacus*, *Eucephalobus*, которые сохранялись и в июле превышали по численности контрольные показатели. Для микотрофов при бензиновом загрязнении почвы характерно значительное снижение численности с односторонним подъемом в июле. Микотрофы в загрязненных бензином почвах занимали второе место по численности после бактериотрофов. Повышенная численность микотрофов в июле находилась в противофазе с сезонным снижением показателей контрольной группы. Следовательно, адаптивное повышение численности микотрофов и бактериотрофов связано с элиминацией неустойчивых к бензину видов, снижением конкуренции и размножением устойчивых видов.

Можно считать, что токсическое влияние бензина в диапазоне концентраций 50—200 г/кг почвы не зависело от уровня загрязнений. Наиболее выраженное токсическое влияние бензина проявлялось в первые два месяца после внесения загрязнений. Бензиновое загрязнение изменяло сезонную динамику общей и эколого-трофической численности почвенных нематод и формировало односторонний тип. Бензиновое загрязнение приводило к развитию структурного типа адаптаций во всех эколого-трофических группах сообществ почвенных нематод. Оно сокращало видовое разнообразие с 26 до 7 родов, значительно снижало численность почвенных нематод и вызывало изменения в структуре сообществ. Наблюдалось перераспределение в группах почвенных нематод:

ассоциированные с растениями нематоды вытеснялись микотрофами.

На основании результатов исследований предлагается ряд бензиноустойчивых родов: бактериотрофы, микотрофы, нематоды, ассоциированные с растениями, паразиты растений, политрофы, хищники. Установлен структурный тип адаптаций сообществ почвенных нематод к токсическому влиянию бензина: элиминация неустойчивых к бензину видов, снижение сезонной численности выживших видов и повышение численности бактериотрофов и микотрофов в июле. Адаптивное повышение численности микотрофов, как и бактериотрофов, связано с элиминацией неустойчивых к бензину видов и снижением конкуренции.

В лабораторных исследованиях установлены временные этапы адаптации сообществ почвенных нематод к нефтезагрязнениям.

При действии бензина в течение первых 4 суток элиминировалось более 60 % почвенных нематод 14 родов из 20. К 8-м суткам видовое разнообразие сократилось дополнительно на два рода, к 13-м — на один род и к 24-м суткам сообщество нематод перестало существовать при концентрации бензина, равной 200 г/кг.

Следовательно, основной отбор устойчивых к бензину нематод происходил в течение первых 4 суток.

Во втором этапе наблюдался дифференцированный отбор в зависимости от концентрации и длительности влияния загрязнителя. Происходило выпадение нематод с колебательным типом динамики численности. К наиболее устойчивым родам почвенных нематод к бензину можно отнести *Chiloplacus*, *Acrobeloides* и *Aphelenchoides*.

Таким образом, при повышении интенсивности загрязнений в сообществах почвенных нематод происходили адаптивные изменения по трем основным направлениям. Первая группа изменений связана с

понижением численности и элиминацией неустойчивых к фактору видов нематод. Вторая группа изменений — повышение численности и видового разнообразия устойчивых родов почвенных нематод. Третья группа изменений — развивались колебательные процессы численности нематод в период действия загрязнений.

При повышении интенсивности действующих факторов колебательные процессы численности нарушались. Устойчивые нематоды переходили в группу неустойчивых, снижалась их численность. Сообщества упрощались до уровня сохранения пионерных видов или сменялись другими примитивными сообществами нематод. Критическая концентрация нефти, нефтепродуктов и сеноманских растворов, при которой происходила элиминация нематод, составляла 50 г/кг.

При биоиндикации нефтезагрязнений, нефтепродуктов и минерализованных растворов использовалось родовое разнообразие нематод в качестве указателей.

Численность эколого-трофических групп может использоваться при оценке уровня загрязнений и интенсивности восстановительных процессов почв. Повсеместная распространенность почвенных нематод позволяет рекомендовать их в качестве универсального биоиндикационного теста при антропогенных загрязнениях почв.

2.4. Почвенные инфузории — биоиндикаторы нефтезагрязнений и нефтепродуктов

Инфузории — высокоорганизованные представители простейших, обитающие в почвах, водоемах (морских, пресных) и живых организмах, являющиеся неотъемлемым компонентом как природных, так и техногенных экосистем.

Инфузории используются при биотестировании как показатели степени антропогенного влияния на окружающую среду.

Для простейших почва представлена системой микроводоемов. Они живут в почвенных порах, заполненных гравитационной или капиллярной водой, и могут находиться в адсорбированном состоянии на поверхности почвенных частиц, в тонких прослойках пленочной влаги. Некоторые виды почвенных инфузорий освоили не только почву, но и растения. Например, инфузории *Colpoda cucellus* и *C. stein* встречались как в верхних горизонтах почвы, так и на стволах деревьев, в пазухах листьев растений, в вогнутых шляпках грибов. Достаточно небольшой капельки росы, чтобы произошел процесс эксцистирования, в росе достаточно питательных веществ, обеспечивающих размножение и рост инфузорий.

Инфузории и жгутиконосцы в условиях нормально увлажненной почвы заселяют заполненные почвенным раствором капилляры, лакуны и межгранулярные структурные полости. Некоторые почвы, характеризующиеся благоприятными водными, пищевыми и специальными условиями, содержат обильную фауну простейших. Любая почва может иметь значительное количество инфузорий во всех ее частях. Они присутствуют в богатых органическим веществом песчаных почвах с широкими межгранулярными щелями.

Для оценки влияния нефти на сообщества почвенных инфузорий в естественных биоценозах светло-серых лесных и болотных почв поверхностно загрязнялись площадки размером 1 м² товарной нефтью при одноразовом внесении нефти с концентрацией 20, 100 и 200 г/кг. В качестве контрольных площадок использовались незагрязненные участки аналогичных светло-серых лесных и болотных почв. Оценивалась численность каждого вида почвенных

инфузорий, находящихся под влиянием нефти, действующей хронически в течение двухлетнего периода.

Сравнительный анализ данных, полученных в опытах с загрязнением почвы нефтью с концентрацией 20, 100 и 200 г/ кг, выявил, что изменения численности почвенных инфузорий происходили в первые дни после внесения нефти.

Влияние на численность инфузорий оказывали небольшие концентрации нефти — 20 г/кг. Увеличение концентрации нефтезагрязнений до 100 г/кг приводило к снижению численности почвенных инфузорий. Высокая гибель инфузорий наблюдалась в первые сутки нефтезагрязнений. В последующий период численность инфузорий изменялась в зависимости от видовой устойчивости. Минимальное значение численности почвенных инфузорий соответствовало концентрации нефти 100 г/кг почвы. Снижение численности цилиофауны, возможно, связано с изменением влажности. Известно, что при нефтезагрязнениях изменяется водопроницаемость почвы. Установлено, что при низкой остаточной концентрации нефти восстановление численности сообществ инфузорий происходило в период весенне-летнего сезона.

Вероятно, процесс восстановления численности почвенных инфузорий связан с остаточным токсическим влиянием нефти на почву. Характер сезонной динамики численности инфузорий остался без изменений. В июне наблюдалось повышение численности почвенных инфузорий в опытном участке с концентрацией внесенной нефти 20 г/кг и 100 г/кг почвы. Происходило постепенное восстановление их численности.

В сентябре общая численность почвенных инфузорий в загрязненных участках сравнивалась, но не превышала их количество в контрольных участках, что указывало на снижение токсичности нефти в опытных участках.

Можно выделить четыре вида устойчивых к нефтезагрязнениям инфузорий: *Chilodonella cucullus*, *Colpoda taupasi*, *Glaucoma pyriformis* и *Litontusva rsaviensis*, присутствие которых прослеживалось в течение 2-летнего периода наблюдений.

При действии нефти на почву происходило снижение численности инфузорий в течение периода наблюдений и в большей степени — при концентрации нефти, равной 100 г/кг почвы. Необходимо отметить синхронность в сезонных колебаниях численности инфузорий на контрольных и опытных участках. Сглаживание сезонной динамики численности инфузорий происходило при увеличении концентрации нефти до 200 г/кг.

Через год после внесения нефти с концентрацией 100 г/кг почвы численность почвенных инфузорий вида *Chilodonella cucullus* увеличилась на загрязненных участках с остаточной концентрацией 0,62 г/кг, что связано со снижением концентрации ароматических углеводородов, токсичных для беспозвоночных животных. Восстановление численности почвенных инфузорий происходило пропорционально снижению остаточной концентрации нефти.

Рассматривая изменение численности вида *Chilodonella cucullus* в условиях высокого уровня нефтезагрязнений (200 г/кг), необходимо отметить депрессивный период в течение первых 29 суток. Снижение численности инфузорий под влиянием нефти характерно и для вида *Colpoda taupasi*. Изменения проявлялись в увеличении частоты колебаний сезонной динамики численности в опытной группе почвенных инфузорий, что указывает на напряженность адаптивных процессов в популяциях при действии нефти.

Сезонная динамика численности почвенных инфузорий *Colpoda taupasi* в восстановительный период характеризовалась повышением. Наблюдалось увеличение числа особей с конца мая при концентрации нефти 0,19 г/кг

после первичного загрязнения 20 г/кг. Проведенные исследования через год после внесения нефти показали, что *Colpoda taurasi* увеличили численность на загрязненных участках.

Анализ сезонной динамики численности инфузорий в почвенном горизонте A_1 через год после внесения нефти выявил синхронизацию сезонных изменений численности в опытной и контрольной группах. Восстановление численности почвенных инфузорий до уровня контрольных значений происходило при остаточной концентрации нефти 0,19 г/кг. При концентрации 0,62 г/кг восстановление численности инфузорий происходило замедленными темпами. Легкие фракции нефти мигрировали по почвенному профилю, расширяя ареал первоначальных загрязнений. Твердый парафин, содержащийся в нефти, плохо разрушается, окисляется на воздухе и способен надолго запечатать поры почвенного покрова, лишив почву свободного влаго- и воздухообмена. В результате обволакивания почвенных агрегатов нефтью ухудшается доступ кислорода.

Рассматривая влияние нефти с концентрацией 200 г/кг на численность почвенных инфузорий, необходимо отметить значительное снижение количества особей под влиянием загрязнений. На уровне выживаемости находились сообщества инфузорий в мае и сентябре.

При действии высоких концентраций нефти происходила элиминация неустойчивых к загрязнениям видов почвенных инфузорий. Вид *Didinium balbianii*. не встречался в пробах почв с июля, вид *Litontusvarsa viensis* не встречался в период сезона наблюдений. Сезонная динамика численности оставшихся видов инфузорий сглаживалась и соответствовала низкой численности выживших особей.

Снижение общего количества видов при нефтезагрязнениях наблюдалось в поверхностном горизонте A_0 в летне-осенний период. В почвенных

горизонтах A^1 и A_2 количество видов инфузорий оставалось постоянным, но происходила частичная замена видов. Вероятно, сохранение количественного и видового разнообразия связано со сменой одних эпизодических видов другими. Нефть является энергетическим субстратом для большой группы органотрофных микроорганизмов, служащих источником пищи для почвенных беспозвоночных. Конкурентная борьба за пищевые ресурсы вела к смене видовой структуры сообществ почвенных инфузорий.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно считать, что хронические нефтезагрязнения в концентрациях 20, 100 и 200 г/кг в светло-серых лесных почвах снижают численность, изменяют сезонную динамику инфузорий и сокращают видовое разнообразие.

Выявлена последовательность видов инфузорий по степени их устойчивости к нефтезагрязнениям: *Chilodonella cucullus*, *Colpoda maupasi*, *Glaucoma pyriformis* и *Litontus varsaviensis*, которую можно использовать при биоиндикации уровня загрязнений почв нефтью.

Обнаружены наиболее устойчивые виды инфузорий к нефтезагрязнениям, которые сохранялись в трех исследуемых почвенных горизонтах торфянистых подзолистых глеевых песчаных почв ($A_{0г}$; $A_{1г}$; $A_{1A_2г}$) и светло-серых лесных почв (A_0 ; A_1 ; A_{1A_2}) в весеннем, летнем и осеннем периодах наблюдений. Необходимо отметить наличие в торфянистых подзолистых глеевых песчаных почвах и устойчивого к нефтезагрязнениям вида *Glaucoma pyriformis*.

Исследованные концентрации нефти не оказывали существенного влияния на количество видов, но приводили к перераспределению спектра видов эпизодических групп

¹ Залялетдинова Н. А., Карташев А. Г. Влияние экологических факторов на сообщества почвенных инфузорий. Томск: Изд. ТУСУР, 2016.

инфузорий, что может использоваться при биоиндикации нефтезагрязнений верхних слоев почвы¹.

2.5. Влияние бензина на сообщества почвенных инфузорий

Негативное экологическое влияние бензина и дизельного топлива заключается в их химической токсичности. Ароматические углеводороды оказывают наркотическое и токсическое действие на живые организмы. Ароматические углеводороды через покровы попадают в организм животных и вызывают отравление.

Для оценки влияния бензина на сообщества почвенных инфузорий в естественных биоценозах светло-серых лесных почв поверхностно загрязнялись площадки размером 1 м² при одноразовом внесении бензина с концентрацией 200 г/кг. В качестве контрольных площадок использовались незагрязненные участки аналогичных светло-серых лесных и болотных почв. Отбор проб осуществляли каждую неделю в пяти точках на каждом участке. Образцы почвы отбирались из поверхностных горизонтов A_0 , A_1 , A_1A_2 . Оценивалась численность каждого вида почвенных инфузорий в зависимости от хронического влияния бензина в течение весенне-осеннего периода.

Численность почвенных инфузорий под действием бензина снижалась кратно и находилась на уровне выживаемости. Необходимо отметить, что концентрация бензина в конце осени значительно снизилась, что не сказывалось на восстановлении численности почвенных инфузорий (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Видовое разнообразие почвенных инфузорий в светло-серых лесных почвах при загрязнении бензином с концентрацией 200 г/кг

Контрольные виды почвенных инфузорий	Период наблюдения				
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
<i>Chilodonella cucullus</i> , O. F. Muller, 1786	+	+	+	+	+
<i>Colpidium colpoda</i> Ehenberg, 1831, Stein	+	+	+	+	+
<i>Colpoda maupasi</i> Ehenberg, 1908	+	+	+	+	+
<i>Didinium balbianii</i> Fabre-Domerdus, 1888	+	–	–	–	–
<i>Glaucoma pyriformis</i> Corliss, 1971	+	+	+	+	+
<i>Litontus varsaviensis</i> Wrzesniowski, 1870	–	–	–	–	–

Обнаружена элиминация двух видов инфузорий с пониженной устойчивостью к бензину: *Litontus varsaviensis* и *Didinium balbianii*. Значительное снижение численности в

сезонной динамике наблюдалось и у наиболее устойчивых видов инфузорий при действии бензина.

Таким образом, загрязнение почв бензином приводило к значительному снижению численности инфузорий, нарушению сезонной динамики и сокращению видового разнообразия. Бензин оказывал значительно более выраженное влияние на сообщества инфузорий по сравнению с нефтью. Почвенные инфузории могут использоваться в качестве биоиндикаторов и указателей восстановления при загрязнении нефтью и нефтепродуктами поверхностных слоев почвы.

2.7. Раковинные амёбы — биоиндикаторы нефтезагрязнений, нефтепродуктов и сеноманских растворов

Раковинные амёбы — одноклеточные организмы, распространенные повсеместно в почвах. Амёбы занимают важное место в трофических цепях почвенных биоценозов. Простейшие осуществляют деструкцию целлюлозы и лигнина, участвуют в высвобождении азота при разложении грибного мицелия, обеспечивают биогенную аккумуляцию элементов минерального питания растений и микроорганизмов. Сообщества раковинных амёб среди почвенных простейших являются удобным объектом для почвенно-зоологических исследований, что связано с наличием твердой раковинки, сохраняющейся после отмирания амёбы и свидетельствующей о таксономическом и экологическом статусе организма.

Раковинные амёбы устойчивы к различным типам антропогенных загрязнений, относительно быстро размножаются. Численность и видовой спектр сообществ рассматриваются в качестве биондикаторов равновесного

состояния почвенной фауны. В нефтезагрязненных районах выживали микроорганизмы, грибы, раковинные амебы и некоторые виды нематод. Хроническое влияние нефтезагрязнений приводило к элиминации неустойчивых видов тестаций в зависимости от концентрации нефти в почве. На основании проведенных исследований по хроническому влиянию нефтезагрязнений с концентрацией 10, 20, 50, 100 и 200 г/кг на сообщества раковинных амеб можно выделить некоторые общие зависимости в изменении структуры и численности сообществ¹.

Анализ данных показывает увеличение видового разнообразия раковинных амеб в 60-е сутки последствия нефти по сравнению с 7-ми сутками. При концентрации 50 г/кг на 7-е сутки влияния нефти сообщества раковинных амеб представлено 12 видами, на 60-е сутки — 23 видами. При концентрации нефти на поверхности почвы равной 100 г/кг на 7-е сутки действия нефти наблюдалось 10 видов, на 60-е сутки — 17 видов, при концентрации 200 г/кг на 7-е сутки — 8, на 60-е сутки — 12 видов амеб. Наблюдаемая зависимость обусловлена снижением остаточной концентрации нефти в почве. При концентрации нефти 10 и 20 г/кг количество видов амеб равно 23, что соответствует количеству видов в контроле. Критической концентрацией нефти в почве является 50 г/кг, когда начинается элиминация неустойчивых к загрязнениям однокамерных родов тестаций.

В загрязненной почве на 7-е и 60-е сутки преобладали раковинные амебы родов *Plagiopyxis*, *Centropyxis*, *Cyclopyxis*. Следовательно, можно считать, что раковинные амебы родов *Plagiopyxis*, *Centropyxis*, *Cyclopyxis* наиболее устойчивы к нефтезагрязнениям. Раковинные амебы родов *Corytion*, *Trinema*, *Arcella* менее устойчивы к

¹ Карташев А. Г., Денисова Т. В., Кулюкина Е. В. Влияние нефти, нефтепродуктов и сеноманских растворов на сообщества раковинных амеб. Томск: Изд. ТУСУР, 2020.

нефтезагрязнениям. Устойчивость трех основных родов (*Plagiopyxis*, *Centropyxis*, *Cyclopyxis*), вероятно, обусловлена строением раковинки, наличием второй камеры, которая используется при загрязненности внешней среды (табл. 2.2).

Динамика изменений численности устойчивых к влиянию нефти амёб свидетельствует о развитии четырех этапов адаптации.

Резистентности в первые 7 суток влияния нефти, снижение численности и видового разнообразия — 14-е сутки, депрессии — в 28-е, 62-е и восстановления численности — в 97–470е сутки. Следовательно, селекция устойчивых к нефти популяций при исследуемом уровне загрязненности происходила в течение 60–70 суток за период генерации 10–20 поколений (Карташев А. Г., Денисова Т. В., Кулюкина Е. В., 2020)

Таблица 2.2

**Видовое разнообразие
раковинных амёб в почвах
суходольного луга при
нефтезагрязнениях**

Род раковинных амёб	Первоначальная концентрация нефти, г/кг											
	7-е сутки						60-е сутки					
	0	10	20	50	100	200	0	10	20	50	100	200
<i>Arcella catinus</i>	+	+	+		–	–	+	+	+	+	–	–
<i>Centropyxis aerophila</i>	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	—
<i>C. elongata</i>	+	+	+	+	–	–	+	+	+	+	+	–
<i>Cyclopyxis eurystoma v. parvula</i>	+	+	+	+	—	–	+	+	+	—	—	—
<i>C. kahli</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

<i>Plagiopyxis penardi</i>	+	+	+	+	+	-	+	+		+	+	—
<i>P. declivis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Heleopera petricola</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
<i>H. sylvatica</i>	+	+	+		-	—	+	+		+	—	-
<i>Hyalosphenia elegans</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>H. papilio</i>	+	+	+	+	+	-	+	+		+	+	—
<i>Nebela collaris</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>N. tubulosa</i>	+	+	+		-	-	+	+	+	+	-	-
<i>Euglypha laevis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>E. compressa</i>	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-
<i>E. ciliata</i>	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-
<i>Assulina muscorum</i>	+	+	+	-	-	—	+	+		+	-	=
<i>Trinema lineare</i> v. <i>minuskula</i>	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	—
<i>T. lineare</i>	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	-
<i>T. penardi</i>	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>T. complanatum</i>	+	+	+		-	+	+	+	+	+	+	-
<i>Corytion dubium</i>	+	+	+	-	-	—	+	+	+	+	+	-
<i>C. orbicularis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Необходимо отметить колебательный характер адаптивной популяционной изменчивости анализируемых групп тестаций.

Повышение концентрации нефти до 100 г/кг приводило к доминированию депрессионной фазы в течение первых 76

суток с последующим восстановительным этапом. Амплитуда колебаний динамики численности значительно увеличивалась и была разнонаправленная в первые недели после внесения нефти, что характеризовало напряженность популяционных перестроечных процессов у представителей различных родов амёб. Отмечалась и десинхронизация в сезонных динамиках численности, которая стабилизировалась в начальный период восстановительного процесса.

В зависимости от длительности действия нефти рассматривались четыре стадии развития адаптации сообществ тестаций:

1) период резистентности в течение первых шести суток, когда сохранялся исходный уровень численности амёб;

2) стадия снижения численности и видового разнообразия сообществ, которая наблюдалась в течение последующих 8 суток и осуществлялась в колебательном режиме;

3) депрессивная стадия цистирования и вымирания неустойчивых видов, при которой происходило значительное снижение численности и видового разнообразия простейших;

4) восстановительная стадия, которая характеризовалась повышением численности и видового разнообразия тестаций пропорционально разложению нефти в почве, происходила в колебательном режиме.

В результате проведенных исследований по влиянию нефтезагрязнений почв сухого луга на раковинных амёб установлено, что устойчивость амёб и выживаемость существенно зависят от их морфологических особенностей: наличия двойной камеры в строении раковин. Виды двухкамерных амёб характеризовались повышенной выживаемостью относительно однокамерных тестаций и способностью к более быстрому восстановлению

численности. Соотношение видов двухкамерных амёб к однокамерным является хорошим биоиндикационным показателем степени нефтезагрязнений почвы.

При действии нефти происходило значительное снижение численности раковинных амёб в почве с последующим восстановлением. Повышенные концентрации нефти влияли на длительность восстановительного периода простейших.

При действии минерализованных сеноманских растворов, увеличивающих засоленность почв, наблюдались изменения в сообществах раковинных амёб. Происходило сокращение их видового разнообразия при концентрации сеноманских растворов 100 г/кг в пределах трех видов, при концентрации 200 г/кг — в пределах пяти видов.

Следовательно, концентрацию сеноманских растворов 100 г/ кг можно рассматривать в качестве критической, приводящей к элиминации неустойчивых видов. При концентрации 100 г/ кг почвы элиминировались три вида однокамерных амёб: *Cryptodiffugia compressa*, *Nebela collaris* и *Trinema complanatum*. При концентрации 200 г/кг наблюдалась элиминация пяти видов тестаций: *Cryptodiffugia compressa*, *Nebela collaris*, *Euglypha laevis*, *Trinema lineare*, *Trinema complanatum*. Все пять видов относились к однокамерным амёбам и характеризовались низкой численностью популяций в контрольных условиях.

Обнаружено, что устойчивость амёб и их выживаемость существенно зависят от морфологических особенностей — наличия двойной камеры в строении раковин. Виды двухкамерных амёб *Cyclopyxis arcelloides*, *Centropyxis vandeli*, *Plagiopyxis glyphostoma*, *Cyclopyxis eurystoma*, *Centropyxis aerophila* характеризовались повышенной выживаемостью и способностью к более быстрому восстановлению первоначальной численности.

При увеличении концентрации сеноманских растворов до 200 г/ кг наблюдались снижение численности раковинных амёб от 10 до 50 % и элиминация неустойчивых видов. Элиминировалось пять видов однокамерных тестаций: в мае — *Trireme complanatum*, *Nebela collaris*, *Cryptodiffugia compressa*, *Trinema lineare*; в июне — *Euglypha laevis*.

Таким образом, на основании проведенных исследований по хроническому влиянию сеноманских растворов на сообщества раковинных амёб в естественных условиях можно считать, что видовое разнообразие амёб является хорошим биоиндикационным тестом минерализации почвенного покрова. Наиболее благоприятная область существования для всех видов тестаций наблюдалась при концентрации внесения сеноманских растворов 50 г/кг.

Повышенная устойчивость двухкамерных амёб наблюдалась при действии бензина. Исследования проводились в естественных условиях в течение пяти месяцев — с мая по сентябрь, с концентрациями внесения бензина 50, 100, 200 г/кг почвы при параллельном контроле. Видовой спектр раковинных амёб в зависимости от концентрации бензина был неоднороден. Основное количество видов раковинных амёб в естественных условиях представляли семейства *Centropuxidae*, *Jung*, *Hyalospheniidae*, *Schulze* — до четырех видов, остальные семейства были представлены одним-двумя видами.

Раковины обнаруженных видов амёб относились к пяти морфологическим типам, имеющим однокамерное строение и двухкамерное, обуславливающее дополнительную изоляцию цитоплазмы от внешней среды. К акростомному типу относились амёбы с терминально расположенным устьем при осевой симметрии с возможным латеральным сжатием: *Euglypha anodonta*, *Nebela dentistoma*, *Nebela militaris*, *Nebela lageniformis*, *Nebela collaris*, *Euglypha laevis*. Плагиостомный тип, характеризующийся эксцентричным

расположением раковин на вентральной стороне и полостью, не разделенной на брюшко и козырек, имели *Chlamydomphrys minor*, *Cryptodiffugia compressa*, *Centropyxis vandeli*, *Trinemalineare*, *Trinemascomplanatum*, *Centropyxisaerophila*. К циклостомному типу относились *Phryganella acropodia*, *Cyclopyxis arcelloides*, *Cyclopyxis eurystoma*, имеющие сферическую или полусферическую форму с уплощенной центральной поверхностью и центрально расположенным устьем. К криптостомному типу относились раковинные амёбы, имеющие щелевидные, эксцентрично расположенные на вентральной подошве псевдостомы, прикрытые выступами дорзальной стенки, — *Plagiopyxis glyphostoma*.

Анализ видового разнообразия раковинных амёб при хроническом действии бензина выявил снижение количества видов при концентрациях 100 и 200 г/кг. При концентрации 100 г/ кг бензина элиминировались три вида: *Cryptodiffugia compressa*, *Nebela collaris*, *Trinema complanatum*. При концентрации 200 г/ кг наблюдалась элиминация семи видов амёб: *Chlamydomphrys minor*, *Cryptodiffugia compressa*, *Nebela militaris*, *Nebela lageniformis*, *Nebela collaris*, *Trinema lineare*, *Trinema complanatum*. Все элиминирующие виды раковинных амёб относились к однокамерным и характеризовались низкой численностью популяций в контрольных условиях. Критическая концентрация бензина, при которой наблюдалась гибель неустойчивых тестаций, равнялась 100 г/кг.

При увеличении концентрации бензина в почве до 200 г/ кг происходили снижение численности раковинных амёб на 50— 70 % и элиминация неустойчивых видов. Виды однокамерных раковинных амёб *Nebela collaris*, *Cryptodiffugia compressa*, *Trinema complanatum*, *Trinema lineare* не встречались. Вид *Nebela lageniformis* наблюдался только в летний период, в осенний период

элиминировался. В сентябре цистировался вид *Chlamydomorphys minor*.

Установлено сокращение видового разнообразия сообществ раковинных амёб: при концентрации бензина 100 г/ кг в пределах трех видов, при концентрации 200 г/ кг — семь видов. Выявлены устойчивые к влиянию бензина виды двухкамерных тестадей: *Cyclopyxis arcelloides*, *Centropyxis vandeli*, *Plagiopyxis glyphostoma*, *Cyclopyxis eurystoma*, *Centropyxis aerophila*. Устойчивость обусловлена формированием внутренней камеры, которая усиливает изоляцию цитоплазмы от внешней среды.

Выявлены неустойчивые к бензину виды однокамерных амёб: *Chlamydomorphys minor*, *Cryptodiffugia compressa*, *Nebela militaris*, *Nebela lageniformis*, *Nebela collaris*, *Trinema complanatum*, *Trinema complanatum*, отсутствие которых в типичных местообитаниях может являться биоиндикационным показателем загрязнений почв бензином.

Действие дизельного топлива изучалось в естественных условиях в течение пяти месяцев — с апреля по октябрь, при загрязнении с концентрациями 50, 100 г/ кг почвы и параллельном контроле. Видовой спектр раковинных амёб в зависимости от концентрации дизельного топлива был неоднороден. Раковины обнаруженных видов амёб относились к пяти морфологическим типам, имеющим однокамерное строение и двухкамерное, обуславливающее дополнительную изоляцию цитоплазмы от внешней среды.

Анализ видового разнообразия раковинных амёб при хроническом влиянии дизельного топлива показал снижение количества видов при концентрации 100 г/кг. При этом элиминировались *Cryptodiffugia compressa* и *Nebela collaris*. Снижение численности тестадей при хроническом действии дизельного топлива происходило в весенне-осенний период и привело к элиминации двух видов амёб. Снижение численности видов наблюдалось с первых

месяцев загрязнения дизельным топливом и сохранялось в течение периода наблюдений.

На основании проведенных исследований можно считать, что хроническое действие дизельного топлива на сообщества раковинных амёб снижает численность и видовое разнообразие тестаций в зависимости от концентрации. Показано сокращение видового разнообразия сообществ раковинных амёб при внесении дизельного топлива 100 г/ кг в пределах двух видов: *Cryptodiffugia compressa* и *Nebela collaris*, наличие которых может использоваться при биоиндикации нефтепродукта.

Построен ряд видов раковинных амёб по степени их устойчивости к загрязнению почв дизельным топливом. Наиболее устойчивыми видами, численность которых не изменялась за период наблюдений, являлись *Phryganella acropodia*, *Cyclopyxis arcelloides*, *Nebela dentistoma*, *Nebela militaris*, *Plagiopyxis glyphostoma*, *Cyclopyxis eurystoma*, *Centropyxis aerophila*. Менее устойчивыми к влиянию дизельного топлива были однокамерные амёбы *Euglypha laevis*, *Euglypha anodonta*, *Trinema lineare*, численность которых использовалась при биоиндикации нефти и нефтепродуктов.

Таким образом, нефть, нефтепродукты и сеноманские растворы оказывают негативное влияние на видовое разнообразие и численность сообществ раковинных амёб. Дифференцированную устойчивость сообществ раковинных амёб используют при биоиндикации уровня деградации и восстановлении экосистем при нефтезагрязнениях.

2.8. Гидробионты — биоиндикаторы нефтяных загрязнений

В районах добычи нефти и газа постоянно существует опасность попадания нефти в водоемы. Нефть и

нефтепродукты относятся к числу наиболее распространенных и опасных загрязняющих веществ. Токсичностью и мутагенностью обладают водорастворимые фракции нефти, в состав которой входят полициклические ароматические углеводороды. Действие нефти и нефтепродуктов многопланово: поверхностная пленка нефти задерживает диффузию газов из атмосферы в воду, нарушает газовый обмен водоемов, создает дефицит растворенного в воде кислорода. Нефтяные продукты и их производные, осажаясь на дно, оказывают токсическое действие на бентосные организмы. Нефтяное загрязнение отрицательно сказывается на качестве воды и условиях обитания гидробионтов. При оценке последствий загрязнения нефтью водоемов необходимо учитывать реакции биологических систем. Беспозвоночные являются обязательным компонентом в экосистемах природных водоемов. Наиболее опасна нефть для организмов, находящихся на ранних стадиях развития.

По влиянию нефти на гидробионтов выделяют два типа загрязнений: нетоксичной органикой нефти и биогенами, вызывающими изменение показателей бентоса и токсическое влияние на сообщества организмов. Нефть не является специфическим токсикантом, поражающим какую-либо одну систему, она вызывает изменения в содержании белка, свободных нуклеотидов и нуклеиновых кислот.

Устойчивость водных экосистем при токсическом действии нефти определяют тремя основными факторами:

- эластичностью — адаптивностью к высокой вариабельности факторов окружающей среды;
- выносливостью — структурное, видовое и функциональное изобилие в экосистемах;
- самоочищающей способностью, которая определяется гидрологическими свойствами —

разведением, перемешиванием, и биогеохимическими — аккумуляцией, сорбцией, инактивацией, седиментацией и др.

Нефтяные углеводороды в концентрации от 0,05 до 0,5 мг/л не влияли на выживаемость организмов, если их токсическое действие не усугублялось действием других факторов. Практически во всех тканях наблюдались физиологические и биохимические изменения, которые приобретали необратимый характер при увеличении концентрации нефти от 0,5 до 50 мг/л. Многие гидробионты чувствительны к нефти в концентрациях ниже ПДК. Так, в воде с содержанием 0,1 мг/дм³ нефти (2 ПДК) рыба приобретает вкус нефти. По результатам исследований, наиболее устойчивыми к нефтяному загрязнению по показателю LC₅₀ являлись макрофиты, олигохеты, сеголетки карпа, хирономиды, моллюски, простейшие, мальки карпа, ракообразные, эмбрионы и личинки осетра (табл. 2.3).

Наиболее чувствительны к нефти по функциональным показателям являются эмбрионы и личинки осетра, ракообразные, моллюски, микроорганизмы, олигохеты, простейшие, мальки карпа, макрофиты и хирономиды.

Нефть в концентрации 0,025—0,1 г/кг вызывала стимуляцию сапрофитных и нефтеокисляющих микроорганизмов, торможение роста амфипод, личинок рыб и регенерацию червей, нарушала метаморфоз у хирономид, интенсивность дыхания у моллюсков и личинок карпа. Происходила смена ведущих видов хирономид — замена мелких форм на крупные устойчивые виды рода *Chironomus* и массовое развитие олигохет.

**Сравнительная устойчивость и
чувствительность гидробионтов по
отношению к нефтезагрязнениям**

LC₅₀ — летальные концентрации, г/кг		ПК — пороговые концентрации, г/кг	
1. Макрофиты	50—64	1. Хирономиды	2,00
2. Олигохеты	18,0	2. Макрофиты	0,90
3. Карп (сеголетки)	18,0	3. Карп, мальки	0,32
4. Хирономиды	10—13	4. Простейшие	0,30
5. Моллюски	7,8	5. Олигохеты	0,14
6. Простейшие	6	6. Микроорганизмы	0,10
7. Карп (мальки)	2	7. Моллюски	0,05
8. Ракообразные	0,23— 1,25	8. Ракообразные	0,04
9. Осетр (личинки) (эмбрионы)	0,6—0,8	9. Осетр	0,03

При концентрации нефти 0,12—1 г/ кг повышалась численность нефтеокисляющих микроорганизмов и снижались доля сапрофитов, плодовитость ракообразных и моллюсков, скорость деления простейших. Уменьшались приросты длины и массы ракообразных, хирономид, моллюсков, червей и рыб. Наблюдалась гибель ракообразных, эмбрионов и личинок рыб.

При концентрации нефти более 5 г/ кг у выживших организмов (ряска, элодея, хирономиды) увеличивалось число хромосомных aberrаций. Происходило нарушение водно-солевого обмена у моллюсков, биохимических, гематологических и гистологических показателей у рыб.

Увеличивалось количество аномалий развития у эмбрионов и личинок осетра, хирономид и дрозофил.

Следовательно, используя шкалу видового разнообразия гидробионтов, можно оценить уровень нефтезагрязнений водоемов.

Концентрация нефти 29 мг/л в течение 2 ч вызывала острое отравление смарид; при 9 мг/л у рыб наступало хроническое отравление.

При изучении действия нефти на молодь осетра отмечалось изменение гематологических показателей при концентрациях нефти 0,1—23 мг/л. У рыб наблюдалась анемия. Выраженный токсический эффект проявлялся при концентрации 2,5—10 мг/л. К концу опыта на 30-е сутки при концентрациях нефти 5 и 10 мг/л содержание гемоглобина в крови рыб снижалось. Углеводороды, аккумулированные в рыбе, передаются человеку как потребителю рыбной продукции, накапливаются в его организме, вызывая различные патологические процессы. Подробно исследованы особенности накопления более 70 химических элементов организмами фито- и зоопланктона на примере Белоярского водохранилища. Отмечались высокие коэффициенты накопления химических элементов зоопланктоном относительно фитопланктона, что делает перспективным использование зоопланктона для биогеохимической индикации загрязнений водных объектов. Токсическое влияние приводило к снижению уровня гемоглобина в зависимости от внесенной концентрации токсикантов. Влияние отсутствовало при концентрации нефти 0,2 г/кг и было максимальным при 0,8 г/кг.

В качестве биоиндикационных объектов нефтезагрязнений и нефтепродуктов использовались аквариумные рыбы гуппи. Гуппи заселяют стоячие водоемы Средней Азии и Америки и могут использоваться при биоиндикации нефти и нефтепродуктов в

нефтедобывающих районах. Гуппи относятся к семейству пецилиевых, включающему живородящие виды. Оплодотворенная икра остается в фолликулах в течение беременности. После оплодотворения развивающийся эмбрион питается своими запасами и не нуждается в питании от матери.

В лабораторных условиях исследовали влияние нефти, бензина и минерализованных растворов на молодь гуппи *Poecilia reticulata*. В первой серии опытов исследовалось влияние нефти на молодь гуппи. В качестве загрязнителя использовали сырую нефть Лугинецкого месторождения, плотность которой составляет 0,7754 г/см³. Нефть содержит 0,3 % серы общей, 0,14 % воды, 2,8 % парафина, менее 2,0 ppm сероводорода и менее 1,0 ppm органических хлоридов. В аквариумы объемом 5 л вносили нефть с концентрацией 0,1; 0,3; 0,5; 0,8 мл/л. В аквариумы помещалось по 10 экземпляров молодых гуппи *Poecilia reticulata*.

Во второй серии опытов изучалось влияние минерализованных растворов на развитие гуппи. Использовались сеноманские растворы Среднеугутского месторождения хлоркальциевого типа, удельный вес — 1,011 г/см³, pH 7,4—7,7, плотность — 1,013 г/см³, вязкость — 18,8 мПа·с. В аквариумы объемом 5 л вносили растворы с концентрациями 50, 100 и 200 мл/л. В аквариумы помещалось по 10 экземпляров родившихся гуппи *Poecilia reticulata*.

В третьей серии исследовалось влияние бензина на родившихся гуппи. Изучалось влияние бензина АИ-95 с плотностью 0,750 г/см³, содержанием серы общей не более 0,05 %, объемной долей бензола не более 5 %, концентрацией смол не более 5 мг/100 см³, содержанием свинца 0,010 г/дм³. В аквариумы объемом 5 л с 10 молодыми особями рыб вносился бензин с концентрацией 0,1; 0,3; 0,5; 0,8 мл/л.

В результате действия нефти при концентрации 0,1 мл/л летальное действие на гуппи не наблюдалось, при концентрации 0,3 мл/л погибло 10 % молоди. При концентрации нефти 0,5 мл/л и 0,8 мл/л погибло 20 % рыб. Наблюдались отклонения в росте и морфологии животных.

Происходило искривление позвоночника рыб, недоразвитие жабр, отмечались повреждения в области плавников, деформации головного отдела, снижение активности и отставание в росте относительно контрольных представителей.

При хроническом влиянии минерализованных растворов на рост и развитие мальков гуппи при концентрациях 50, 100, 200 мл/л изменялись поведение, физиологическое состояние, морфологические показатели и выживаемость рыб. Минерализованные растворы приводили к аномалиям плавников, потере аппетита и снижению двигательной активности гуппи. Развивались заболевания: плавниковая гниль, ихтиофтириоз, плистофороз, гермафродизм, тетрахиноз, микобактериоз, красная парша. Процентное соотношение больных и здоровых рыб зависело от концентрации растворов.

Результаты исследований по влиянию бензина на рост и развитие гуппи показали, что появление мальков в контроле и в опыте началось в 1-е сутки эксперимента. Количество выжившей молоди в опытной серии составляло от 70 до 100 % в зависимости от концентрации бензина.

Анализ экспериментальных данных выявил изменения морфологических показателей гуппи при концентрациях бензина 0,5 и 0,8 мл/л. Бензин негативно влиял на рост и развитие молодых рыб. При концентрациях 0,5 мл/л и 0,8 мл/л бензина наблюдались искривление позвоночника, деформация головного отдела и плавников.

Таким образом, влияние нефти и нефтепродуктов приводило к морфологическим патологиям роста и развития рыб: аномалиям черепа, туловищного, хвостового отделов,

повреждению жабр и плавников. Наблюдалось снижение выживаемости рыб, задержка в развитии. Аномалии плавников встречались в 30 % случаев при загрязнении бензином, в 25 % — при загрязнении сеноманскими растворами и в 35 % — при загрязнении нефтью. Задержки в развитии наблюдались в 25 % случаев. При действии сеноманских растворов отмечалось появление: анорексии — 16 %, сколеоза — 12 %, алкалоза — 11 %.

Наименее устойчивы к различным токсичным воздействиям молодые рыбы в стадии раннего онтогенеза в период перехода на активное питание. Ранний онтогенез рыб является периодом жизненного цикла, в течение которого организм наиболее подвержен влиянию внешних факторов. Следовательно, выявленные морфологические отклонения в развитии Гуппи можно использовать в качестве биоиндикаторов уровня загрязнений водоемов нефтью и нефтепродуктами.

2.9. Коловратки — биоиндикаторы нефтезагрязнений

пресноводных водоемов

Коловратки (*Rotatoria*) являются основными представителями микрозоопланктона пресноводных водоемов Западной Сибири и кормом для беспозвоночных и личинок рыб. Сообщества коловраток характеризуются значительными изменениями численности в зависимости от внешних условий. Видовая устойчивость и цикличность размножения коловраток позволили им успешно выживать при изменении условий среды обитания. Популяционные механизмы устойчивости сообществ коловраток практически не исследовались. Для оценки влияния нефти на коловраток проведены опыты в лабораторных условиях,

в контролируемых природных условиях и в естественных условиях при разливах нефти.

Нефтезагрязнения в диапазоне концентраций 0,25—2 г/л оказывали негативное влияние на сообщества планктонных видов коловраток. При действии нефти происходило снижение численности и сокращение видового разнообразия беспозвоночных. Выявлены наиболее устойчивые к нефтезагрязнениям виды коловраток: *Notholca squamula frigida* и *Keratella cochlearis macracantha*. Определена область адаптивных концентраций нефти в пресноводных водоемах для коловраток, соответствующая 0,25 г/ л. При адаптивных концентрациях нефти наблюдалось восстановление численности и формирование жизнеспособных популяций коловраток.

Анализ количества органотрофных бактерий выявил повышение их численности в нефтезагрязненных водоемах. Повышенное относительно контрольных условий количество бактерий наблюдалось в 7-е, 15-е и 25-е сутки, что, вероятно, стимулировало дополнительное размножение коловраток. При изучении общей численности сообществ коловраток в загрязненных и незагрязненных водоемах установлена асинхронность периодов активного размножения в опытных и контрольных сообществах коловраток. Два периода активного размножения отмечались в контрольных водоемах: в 3-и и 27-е сутки, и три — в опытных: в 5-е, 9-е и 43-и сутки наблюдений. Наблюдалось значительное повышение численности коловраток при вспышках размножения в опытных водоемах, что можно рассматривать в качестве адаптивной реакции популяций при действии нефти.

Влияние нефти с концентрацией 0,25 г/ л приводило к изменению структуры сообществ коловраток в зависимости от длительности действия и видовой устойчивости.

Для первичной реакции коловраток при загрязнении водоемов характерно кратковременное повышение

численности с последующим снижением и переходом в колебательный режим. Вымирали неустойчивые виды. Некоторые виды коловраток способны сохраняться, откладывая яйца в ил, или переходить в состояние анабиоза.

В 9-е и 33-и сутки действия нефти происходила элиминация видов *Polyarthra longiremis* и *Synchaeta pectinata*. В 49-е сутки практически вымирал вид *Brachionus calyciflorus anuraeiformis*. На низком уровне численности находились популяции видов *Notholca squamula frigida*, *Filinia longisetata*, *Keratella cochlearis macracantha*.

Начиная с 81–105-х суток наблюдалось восстановление численности популяций коловраток выживших видов. Следовательно, при действии нефти происходило сокращение видового разнообразия сообществ коловраток и снижение численности популяций. Восстановление численности сообществ осуществляется устойчивыми к нефти видами коловраток.

На основании проведенных исследований в диапазоне концентраций нефти 0,25—2 г/ л установлено негативное влияние нефти на сообщества планктонных коловраток, приводящее к сокращению видового разнообразия.

Выявлены наиболее устойчивые к нефтезагрязнениям виды коловраток — *Notholca squamula frigida* и *Keratella cochlearis macracantha*, которые можно использовать при биоиндикации нефтезагрязнений. Определена область адаптивных концентраций нефти в пресноводных водоемах для коловраток — 0,5—0,25 г/ л. В адаптивных диапазонах концентраций нефти наблюдалось восстановление численности и формирование жизнеспособных сообществ коловраток.

Для устойчивых к нефти популяций коловраток характерны следующие адаптивные этапы: активное размножение, волнообразное изменение численности, отбор наиболее устойчивых особей, частичное или полное

восстановление численности сообществ коловраток с новой доминирующей видовой структурой выживших популяций.

Циклические изменения численности коловраток в опытных и контрольных группах аналогичны по длительности. Для популяций коловраток характерно волнообразное изменение численности, что связано с особенностями их размножения. При ухудшении условий существования под влиянием нефти наблюдалось увеличение амплитуды численности без изменений длительности периодов колебаний в исследованных возрастных группах, что можно рассматривать в качестве адаптивных реакций популяций коловраток.

Повышение концентрации нефти приводило к изменению периодов колебаний и десинхронизации численности популяций коловраток. Повышение уровня загрязненности стимулировало активный процесс размножения всех выживших видов коловраток.

После вымирания и сокращения численности неустойчивых видов следует этап активного размножения, отбора устойчивых видов и заселения ими зоны обитания.

В природных водоемах после внесения бензина 5—10 г/л наблюдалось активное размножение коловраток, снижение численности и повторное размножение. Появлялись новые виды, предварительно не наблюдаемые в исследуемых водоемах: *Filinia cornuta cornuta*, *Notholca squamula frigida*. Вероятно, происходило массовое размножение малочисленных видов. Количество видов в загрязненном бензином водоеме было ниже, чем в контроле.

Растворы дизельного топлива в минимальных концентрациях первоначально ингибирует, а затем стимулирует развитие инфузорий и коловраток. Причиной вспышки численности инфузорий в первые сутки являлись нефтеокисляющие бактерии. В начале опыта нефтепродукты переходили в воду в больших количествах, затем скорость перехода снижалась. Оставшаяся нефтяная

пленка является субстратом и источником пищи для коловраток. По мере уменьшения площади пленки часть коловраток переходила в стадию анабиоза. Среди наиболее чувствительных видов зоопланктона к токсическому действию нефтепродуктов отмечаются *Polyphemus pediculus* и *Daphnia longispina*. Наименее чувствительным видом является *Cyclops sp.*

Следовательно, численность и видовое разнообразие коловраток можно рассматривать как универсальный биоиндикатор, свидетельствующий об очищении водоемов, улучшенном питании мальков рыб и беспозвоночных и восстановлении водоемов.

2.10. Донные организмы — биоиндикаторы нефтяных загрязнений

Осевшие и трансформирующиеся на дне водоемов загрязнения определяют их суммарное влияние и являются долговременным источником негативных последствий. Донные организмы значительно выносливее к нефтяным загрязнениям, чем планктонные. Сравнительный анализ устойчивости к токсикантам показал, что гаммариды — бокоплавы и моллюски характеризуются более высокой устойчивостью по сравнению с ветвистоусыми и веслоногими ракообразными. При накоплении в донных осадках твердых фракций буровых отходов нарушения в бентосе носят точечный, временный и обратимый характер. Для наиболее уязвимых неподвижных форм бентоса (губки, гидроиды) токсичен слой осадка около 5 мм, гибель крупных моллюсков происходит при толщине слоя буровых отходов более 10—15 см.

Исследования показали, что во всех типах донных отложений увеличена численная доля комаров-звонцов

подсемейства *Prodiamesinae*. Наиболее уязвимыми организмами в донных ценозах при загрязнениях нефтью являлись личинки ручейников и двустворчатые моллюски, численность которых сокращалась. В комплексном нефтяном загрязнении водных объектов углеводороды нефти не всегда играют основную роль в токсическом действии. Так, устойчивые к органическому загрязнению олигохеты чувствительны к серосодержащим веществам, гексахлорану, ионам тяжелых металлов.

Многие характеристики макрозообентоса: видовое разнообразие, численность, биомасса — зависят от физических свойств грунта, количества преобразованного бактериями органического вещества и от качества отложений. Для грунтов с признаками нефтяного загрязнения свойственна бедность видового состава при высокой численности и биомассе устойчивых к загрязнению форм. При сильном хроническом загрязнении наблюдалось угнетение всех сообществ, включая устойчивые формы. При загрязнении ароматическими углеводородами снижалась численность бентоса, типичные реофильные виды донных беспозвоночных заменялись устойчивыми к загрязнителям видами. Максимальные значения численности и биомассы олигохет, хирономид и моллюсков отмечались при содержании водорастворимых битумов 40 мг/ кг грунта. При более высоких концентрациях — 82 мг/ кг — происходило снижение численности отдельных видов и зообентоса в целом.

Следует отметить, что влияние водорастворимых битумов на группы зообентоса неоднозначно. При концентрации битумов 40 мг/ кг создавались оптимальные условия для развития микрофлоры, повышающей пищевую ценность детрита, что способствовало обилию гидробионтов. При дальнейшем увеличении содержания водорастворимых битумов наблюдалось снижение численности моллюсков и хирономид.

При загрязнении донных отложений дизельным топливом смертность личинок хирономид вида *Chironomus riparius* была выше при концентрации 220—320 мг/ кг.

Нефть разных месторождений по-разному влияла на донных беспозвоночных, что связано с различным фракционным составом углеводородов. Нефть с высоким содержанием нафтеновых кислот, смол и серы наиболее токсична для гидробионтов. Помимо микробных деструкторов нефти, донные организмы участвовали в преобразовании нефти в донных осадках. Гидробионты способны накапливать в своем организме нефтепродукты. Полихеты способствовали преобразованию нефти в грунте, они перерабатывали тяжелые фракции нефтепродуктов. В исследованиях, проведенных на *Limnodrilus hoffmeisteri*, показано, что илистый субстрат, прошедший через кишечник червя, имел более низкое содержание нефти, чем исходный грунт¹.

Проходя через организм мидий, углеводороды нефти претерпевали качественные и количественные изменения по сравнению с трансформацией нефти в морской воде. Накопление углеводородов мидиями зависит от степени исходного загрязнения нефтью; физиологического состояния, связанного с недостатком питательных веществ; химического спектра углеводородов. Моллюски способны продолжительное время сохранять нефть в своем теле.

Загрязненные донные отложения являются источниками передачи нефтяных углеводородов по трофической цепи: ил — водоросли — мелкие планктонные организмы — рыбы. Концентрация веществ в последующем звене трофической цепи может возрастать. Высокие концентрации нефтепродуктов в воде и донных отложениях вызывали перестройку всего бентосного сообщества. В сильно загрязненных водных объектах встречались личинки мух

¹ Воробьев Д. С. Биологические основы очистки донных отложений водных объектов от нефти и нефтепродуктов: дис. ... д-ра биол. наук. Томск, 2013.

стратиомид, брюхоногие моллюски, клопы-водомерки, личинки комаров кулицид и хаборид. В обводненном нефтешламном амбаре с содержанием нефти более 251 г/кг зообентос не присутствовал. В водоемах с низким содержанием нефтепродуктов активно развивались диатомовые, зеленые, хлорококковые и эвгленовые водоросли. При увеличении нефтяной нагрузки на водоем снижалось видовое разнообразие низших растений.

Инфузории при увеличении содержания нефтепродуктов повышали численность и биомассу, если сохранялось несколько видов, устойчивых к загрязнению. Инфузории и некоторые водоросли способны активно участвовать в процессах самоочищения водных объектов от нефти.

Разработан классификатор уровней загрязнения по состоянию донных сообществ зообентоса, который использовался при биоиндикации донных нефтезагрязнений водоемов¹.

Слабое нефтезагрязнение — 0,021—0,050 г/кг. Незначительные изменения количественных показателей бентоса. Стимуляция численности и биомассы сапрофитных и нефтеокисляющих микроорганизмов, увеличение видового разнообразия и численности хирономид.

Умеренный уровень нефтезагрязнений — 0,051—0,15 г/кг. Пороговое состояние: выпадение из сообщества чувствительных видов и перестройка в сторону преобладания наиболее устойчивых видов хирономид, олигохет, пик плотности олигохет рода *Limnodrilus*. Встречаются наиболее устойчивые виды поденок, ручейников, пиявок.

Сильный уровень нефтезагрязнений — 0,160—0,5 г/кг. Область нарастающих изменений: снижение видового

¹ Михайлова Л. В., Исаченко-Боме Е. А. Разработка и апробация норматива содержания нефти в донных отложениях поверхностных водных объектов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 5. С. 530—542.

разнообразия, замена мелких форм хириноmid на крупные устойчивые виды рода *Chironomus*, массовое развитие олигохет рода *Limnodrilus*. Снижение количественных показателей отдельных групп и зообентоса в целом.

Экстремальный уровень — 0,501—1 г/ кг. Значительное обеднение донного сообщества. Пик плотности устойчивых хириноmid и олигохет рода *Tubifex*. Выпадение из сообщества чувствительных видов ручейников, поленок, вислокрылок, мокрецов, жуков, слепней, нематод, остракод, пиявок и двустворчатых моллюсков. Стимуляция размножения нефтеокисляющих бактерий и снижение численности сапрофитов.

Критический уровень нефтезагрязнений — 5 г/ кг и больше. Нарушение сообщества по всем структурно-функциональным показателям, значительное снижение численности и видового разнообразия, доминирование устойчивых видов хириноmid рода *Chironomus*, снижение численности углеводородокисляющей микрофлоры (УОМ).

Повышение токсичности донных отложений по мере увеличения их сорбционных характеристик подтверждено в опытах на *Chironomus riparius*. Токсичность по критерию выживаемости, времени вылета имаго при заданных концентрациях внесения нефти достоверно не отличалась от контрольных особей, но линейный размер личинок на 20-е сутки экспозиции в системе с илистыми грунтами был на 15—35 % меньше по сравнению с песчаным.

Характерно, что слабое загрязнение водоема нефтью ведет к усложнению структуры сообщества зообентоса — экологическому прогрессу. Увеличивается количество видов, численность, усложняются межвидовые отношения, повышается пространственное разнообразие структуры сообщества, уровень трофности. В составе донных сообществ лидирующая роль принадлежит эвритопным видам из малоцетинковых червей, тубифицидам,

двустворчатым моллюскам и личинкам хирономид; биомасса бентоса повышается.

Повышение уровня нефтезагрязнений водоема приводило к упрощению экологической структуры сообществ — экологическому регрессу. Сообщества донных беспозвоночных реагировали на изменения условий посредством метаболизма. Видовое разнообразие сокращалось, упрощалась пространственная структура.

Увеличивались количественные показатели бентоса за счет эврибионтных видов. Массовое развитие получали олигохеты и хирономиды.

Промежуточное положение между экологическим прогрессом и регрессом занимала экологическая модуляция. В составе донной фауны сообщества постепенно перестраивались структурно: изменялся состав фауны, сменялись виды-доминанты и субдоминанты, основную роль в сообществах играли олигохеты и хирономиды. Максимальный уровень загрязнения приводил к гибели донных животных и полной деградации сообществ бентоса.

Процесс самоочищения от дизельного топлива довольно длительный. В его окислении принимают участие различные виды живых организмов: на начальном этапе — нефтеокисляющие бактерии, жгутиконосцы и инфузории, на конечном этапе — коловратки.

Олигохеты — распространенные представители бентоса рек и озер, устойчивы к нефтезагрязнениям и используются при биоиндикации уровней загрязнения водоемов. Фауна олигохет пойменных озер средней Оби многочисленная: 32 вида, или 74,4 % общего числа видов олигохет бассейна средней Оби.

Малощетинковые черви устойчивы к органическому загрязнению и химическим веществам, но чувствительны к серосодержащим веществам, фенолам, гексахлорану, ионам тяжелых металлов. Используя в пищу грунт, они

концентрируют в теле химические вещества, находящиеся в донных отложениях. При концентрациях нефти 0,5—5 г/ кг наблюдалась перестройка структуры сообществ доминирующего комплекса хириноид — преобладали виды рода *Chironomus* и происходило массовое развитие олигохет рода *Limnodrilus*. В составе зообентоса озера Средний Кабан, подверженного нефтяному загрязнению, доминирующий комплекс представлен олигохетами рода *Limnodrilus* и личинками хириноид.

Следовательно, олигохеты являлись наиболее устойчивыми к нефтяному загрязнению после макрофитов по показателю LC₅₀ при концентрации 18 г/ кг.

По мере удаления от источников загрязнения численность олигохет, представленных тубифицидами в бентосе, повышалась за счет большей выносливости групп к нефтяному загрязнению, что подтверждают и другие исследователи. По результатам очистных работ на озере Щучьем Усинского района Республики Коми показано, что одними из первых организмов, которые заселяли донные ценозы озера, являются олигохеты. В первый год численность олигохет составила 90—100 %, биомасса — 80—100 % в бентосе.

Тубифициды, являясь типичными представителями донной фауны, способны выдерживать сильные загрязнения донных отложений и активно участвовать в процессах самоочищения. Олигохеты наиболее оптимально подходят для использования на биологическом этапе очистки донных отложений от нефти при концентрациях свыше 6 г/ кг. При концентрациях нефти в иле 6—7 г/ кг наблюдается снижение выживаемости червей лимнодрилусов, максимум выживаемости соответствует концентрации 3—4 г/ кг нефти.

Ил, загрязненный «свежей» нефтью, обладает более высокой токсичностью для лимнодрилусов, чем старый ил с загрязнением. Показано, что в результате

жизнедеятельности тубифицид *Limnodrilus hoffmeisteri* концентрация нефти в донных отложениях 0,836; 3,344; 6,688; 10,032; 16,720 г/кг снижалась за 30 суток в 1,20—1,72 раза, или на 16,67—41,90 %, что использовалось в мероприятиях по биологической очистке донных отложений водоемов от нефти. Показано, что тубифициды, перемещаясь в загрязненных «свежей» нефтью грунтах, предпочитают незагрязненные участки ила. Ил, загрязненный «свежей» нефтью, обладает максимальной токсичностью в силу наличия токсичных летучих компонентов. Тубифициды активно перемешивают донные отложения. Ил, прошедший через кишечник лимнодрилусов, содержит на 22,4—25,0 % меньше нефти, чем исходный. Снижение концентрации нефти связано с ферментативными и бактериальными процессами, проходящими в кишечнике червя.

Бентос является комплексным экологическим показателем, позволяющим оценивать уровень антропогенных загрязнений и прогнозировать этапы самоочищения водоемов. Необходимо отметить, что разложение нефти в водоемах зависит от вида водоема и его экологических особенностей. Основу нейстонного перифитона на нефтяных агрегатах составляют прикрепленные организмы: бактерии, водоросли, мшанки, сидячие полихеты, усонogie раки; подвижные формы: изоподы, полихеты, брюхоногие моллюски. В разных районах океанов состав нейстонного перифитона на агрегатах различен. В Атлантике встречаются нефтяные агрегаты, покрытые гетеротрофными микроорганизмами, диатомовыми и синезелеными водорослями, колониальными животными — мшанками, усоногими раками *Lepas fascicularis*. На отдельных агрегатах обнаружены кладки яиц океанических водомерок.

Главная роль в деструкции нефтяных углеводородов в воде принадлежит биогенному фактору —

микроорганизмам-деструкторам. Сообщества четко индексируют «концентрационную границу» нефтяного загрязнения, ниже которой микробные ценозы «вода — грунт» еще справляются с нефтяными фракциями в донных отложениях и стабилизируют ситуацию: это 40 мг/ кг, 60 мг/ кг сухого грунта.

При избыточном нефтяном загрязнении повышались численность и биомасса бактерий, но снижалась их общая активность. Накапливались токсичные продукты анаэробного распада, за летний период микроорганизмами поверхностных вод может быть окислено от 1,2 до 2,5 мг нефтяных углеводородов в 1 л. В связи с активной трансформацией и деградацией нефтяных углеводородов изменялась структура сообществ, сохранялись более устойчивые к биологической переработке вещества токсичных продуктов. При загрязнении ароматическими углеводородами снижалась численность бентоса, типичные реофильные виды беспозвоночных заменялись толерантными к загрязнителям видами.

Загрязнение донных осадков нефтью и нефтепродуктами приводит к перестройке бентосных сообществ водных экосистем и является долговременным. Рост видового разнообразия донных сообществ рассматривается как процесс восстановления водоемов.

2.11. Моллюски — биоиндикаторы антропогенных загрязнений

Значение моллюсков для биоиндикации загрязнений водоемов трудно переоценить. Моллюски питаются, процеживая воду или поедая донную органику. На 1 м² дна водоема за сутки моллюски фильтруют до 200 м³ воды. Моллюски — катушки, перловицы, беззубки утиные — обитают только в водоемах с чистой водой. Битиния,

горошина, лужанка, прудовик, перловица вздутая, физы живут в водоемах со слабозагрязненной водой. Шаровка роговая предпочитает водоемы с умеренным загрязнением. В результате действия растворов с содержанием нефти 10 мл/ л через час наблюдали изменения в синтезе белка. У байкальских амфипод отмечали снижение, у моллюсков — увеличение уровня содержания белков теплового шока. Полученную зависимость использовали для экспресс-оценки наличия в воде нефти.

Проходя через организм мидий, углеводороды нефти претерпевали качественные и количественные изменения по сравнению с трансформацией нефти в морской воде. Накопление углеводородов мидиями зависело от нескольких факторов: степени исходного загрязнения; физиологического состояния, связанного с отсутствием или недостатком питательных веществ; химического спектра углеводородов в нефти и нефтепродуктах. Выявлены различия в накоплении моллюсками нефтяных углеводородов разных месторождений, которые отличаются друг от друга химическим составом.

При изучении влияния нефтяного загрязнения воды на физиологические показатели двустворчатых моллюсков установлено, что последствия проявлялись при действии низких концентраций нефтепродуктов — 1,13 мг/ л, при 2,25 мг/ л и 4,51 мг/ л наблюдалась гибель животных. Концентрация нефтепродуктов в воде в пределах от 1,13 до 2,25 мг/ л вызывала гибель большинства видов моллюсков в течение часа. Наиболее устойчивым к действию нефтепродуктов видом двустворчатых моллюсков являлся *Dreissena polymorpha*. Молодые особи менее устойчивы к влиянию нефтепродуктов, чем взрослые. Молодь фильтрует воду активнее взрослых, что связано с большей интенсивностью обмена веществ.

При концентрации нефти 1 мл/ л и 2 мл/ л в лабораторных условиях наблюдались изменения в

поведении пресноводных моллюсков вида *Planorbarius corneus*. Через 11 суток происходила гибель моллюсков при концентрации нефти 2 мл/ л. При концентрации нефти 4 мл/ л на вторые сутки 50 % особей элиминировалось. Критичной являлась концентрация 8 мл/ л, при которой на 3-и сутки погибло 80 % моллюсков. При концентрации нефти в воде 4 мл/ л повышалась потребность в кислороде, что стимулировало двигательную активность моллюсков. Потребность в питании не была ключевым показателем, влияющим на активность. При концентрации 8 мл/ л отмечалось снижение двигательной активности и выпадение из раковин мягких тканей моллюсков, что свидетельствовало о необратимых изменениях физиологических процессов. Постоянное пребывание в верхних слоях воды являлось показателем нехватки кислорода. Токсическое влияние нефти приводило к плотному закрытию створок раковины моллюсков на 4-е сутки опыта, что можно рассматривать в качестве специфической стресс-реакции на токсические загрязнения.

В первые 2 суток после добавления нефти 4 мл/ л численность моллюсков оставалась без изменений. На 3-и сутки отмечалось сокращение численности. Концентрация нефти 8 мл/ л оказалась критичной для моллюсков. В первые часы после добавления нефти численность особей сократилась на 40 %. Во 2-е сутки сокращение численности продолжалось, к 3-м суткам происходила гибель всех моллюсков. При постепенном хроническом внесении нефти исследовалась адаптация моллюсков к нефтезагрязнениям.

При постепенном увеличении концентрации нефти на 0,5 мл/ л за сутки адаптация к загрязнениям осуществлялась в течение 3 суток. Элиминация неадаптированных особей происходила на 4-е сутки после внесения нефти. При постепенном повышении концентрации нефти увеличивался период выживаемости моллюсков. Гибель

всех особей отмечалась на 10-е сутки без внесения дополнительного количества нефти. Следовательно, при постепенном внесении нефти ее влияние на организм моллюсков менее токсично, чем при внесении разовой высокой концентрации.

В исследованиях по влиянию нефти на личиночные стадии пресноводных моллюсков показана дифференцированная устойчивость этапов онтогенеза животных. При действии нефти на икру моллюсков на первой стадии эмбрионального развития-дробления происходило замедление в два раза ее развития до личиночной стадии трохофоры независимо от концентрации нефти. Повышенная концентрация нефти, равная 8 мл/ л, замедляла развитие в два раза на личиночной стадии велигера. На стадии оседания замедление в развитии при действии нефти составило 20 %. Необходимо отметить, что при всех исследованных концентрациях нефтезагрязнений наблюдалась гибель молодых особей в пределах 20 %. Концентрация нефти, равная 1 мл/ л, практически не оказывала влияния на онтогенез моллюсков. При концентрации 4 мл/ л наблюдалось увеличение периода выхода из оболочки яйца и сокращение численности молодых животных на 6 % относительно контрольных кладок. Концентрация нефти, равная 8 мл/ л, приводила к увеличению длительности развития на стадиях оседания и выхода личинок из оболочки яйца.

При действии нефти в начальной стадии развития личинки — трохофоры происходило замедление развития. Нарушение в онтогенезе сопровождалось увеличением периода прозрачности кладки моллюска и меньшими размерами при концентрации нефти 4 и 8 мл/ л. Особи с аналогичными морфологическими отклонениями не выходили из яиц.

Внесение нефти в начальной стадии велигера приводило к ускорению развития моллюсков при выходе из оболочки

ядра. Смертность молоди увеличивалась на 10 % при концентрации нефти 4 и 8 мл/ л. Смертность личинок моллюсков наблюдалась на стадии оседания из-за высыхания мягких тканей при действии нефти. При помещении кладок на стадии оседания в среду с концентрациями нефти 1 и 4 мл/ л существенных отклонений в длительности выхода личинок из кокона не наблюдалось. При концентрации нефти 8 мл/ л выход личинок затягивался.

Таким образом, при действии нефти изменяется поведение моллюсков. В качестве защитной стресс-реакции можно рассматривать плотное закрытие створок раковин моллюсков. Выживаемость моллюсков *Planorbis corneus* в загрязненной нефтью воде изменялась в зависимости от концентрации поллютанта. Наибольшее токсическое влияние оказывала нефть с концентрацией 8 мл/ л — гибель организмов происходит на 3-и сутки. С увеличением концентрации загрязнителя замедляется процесс эмбриогенеза, увеличивается период с момента образования велигера до выхода моллюска из кокона. Наиболее устойчивыми к токсическому влиянию нефти являются стадии велигера и оседания в оболочке яйца.

Во второй серии опытов исследовалось влияние бензина и дизельного топлива на поведение и развитие моллюсков *Marisa cornuarietis*. При концентрациях бензина 0,5 и 1 мл/ л на 10-й минуте после его внесения увеличилась дыхательная активность взрослых моллюсков, наблюдалась повышенная потребность в кислороде, что стимулировало двигательную активность. На 30-й минуте при концентрации 0,5 мл/ л моллюски находились в донной толще воды, признаков движения не наблюдалось. При концентрации бензина 1 мл/ л у моллюсков сохранялась высокая двигательная активность. При концентрациях бензина 0,5 и 1 мл/ л на 2-е сутки отмечалось снижение двигательной активности, связанное с защитной реакцией

моллюсков на загрязнение водной среды бензином. На 4-е сутки при концентрациях 0,5 и 1 мл/ л у 60 % моллюсков проявлялась двигательная активность, 40 % моллюсков находились в донной толще без признаков движения.

На седьмые сутки при концентрации бензина 0,5 мл/ л погибло 40 % моллюсков, при концентрации 1 мл/ л — 60 % моллюсков. При концентрациях бензина 0,5 мл/ л и 1 мл/ л выжившие моллюски находились в верхней части аквариумов в поисках кислорода. На восьмые сутки моллюски находились в угнетенном состоянии и не передвигались. Выжившие моллюски на 12-е сутки пытались покинуть область загрязнений, у них повышалась дыхательная деятельность. Концентрации бензина 0,5 мл/ л и 1 мл/ л не являлись критическими — 60 % моллюсков выживали. При концентрации бензина 2 мл/ л на 12-е сутки погибли все моллюски.

Поведенческие реакции исследуемых моллюсков при действии дизельного топлива были аналогичны реакциям при действии бензина. Негативные изменения в поведении и смертность моллюсков наблюдались в более ранний период — в 5—6-е сутки последействия.

Анализ выживаемости моллюсков под влиянием дизельного топлива показывает, что при его концентрации 0,5 мл/ л численность моллюсков снижалась на 20 % в 9-е и 12-е сутки. При концентрации дизельного топлива 1 мл/ л численность моллюсков снижалась на 40 и 50 % в 6-е и 9-е сутки хронического влияния. Концентрации дизельного топлива 0,5 и 1 мл/ л оказывали более выраженное негативное влияние, чем бензин. Концентрация дизельного топлива 2 мл/ л являлась критической для моллюсков, и на 8-е сутки погибли все особи.

Следовательно, нефть, дизельное топливо и бензин дифференцированно влияют на гидробионтов, что необходимо учитывать при разработке методов биоиндикации. Большая смертность организмов в водных

эмульсиях дизельного топлива вызвана образованием маслянистой пленки на водной поверхности, которая затрудняет доступ к кислороду. Бензин не образует пленку на водной поверхности и действует на организм непосредственно токсическим химическим составом.

Следовательно, хроническое влияние дизельного топлива приводит к более выраженным негативным последствиям, чем бензина и нефти, на взрослых моллюсков за счет образования маслянистой пленки. Негативные последствия влияния бензина и дизельного топлива на личиночное развитие пресноводных моллюсков аналогичны и определяются токсичностью нефтепродуктов при концентрациях: 0,5, 1 и 2 мл/ л.

Личиночные стадии моллюсков чувствительны к действию бензина, дизельного топлива и нефти. Концентрации бензина и дизельного топлива 1 мл/ л и 2 мл/ л приводят к гибели личинок. При действии дизельного топлива с концентрацией 1 мл/ л гибель личинок происходит на стадии оседания в яйцо, при действии бензина — на стадии выхода молоди. Для взрослых моллюсков летальной является концентрация бензина и дизельного топлива 2 мл/ л.

Поведение моллюсков может использоваться при биоиндикации степени загрязнений нефтью и нефтепродуктами. Переносные аквариумы с моллюсками использовались для определения степени загрязненности нефтепродуктами природных водоемов в районах нефтедобычи.

Таким образом, в настоящее время имеются многочисленные результаты исследований по влиянию загрязнений нефтью и нефтепродуктами гидробионтов. Определены виды животных — указатели, устойчивые к загрязнениям, и виды, характеризующие экологическое восстановление водоемов, что позволяет осуществлять

биоиндикационный мониторинг антропогенных
загрязнений гидросфере.

Контрольные вопросы и задания

1. Какова распространенность дождевых червей?
2. Как нефть влияет на численность червей?
3. Как нефтепродукты влияют на численность червей?
4. Какова устойчивость нематод к нефтезагрязнениям?
5. Какова устойчивость нематод у минерализованным растворам?
6. Какова устойчивость нематод к бензину?
7. Каким образом используются инфузории при биоиндикации нефтезагрязнений?
8. Каковы особенности биондикации бензина почвенными инфузориями?
9. Насколько устойчивы почвенные инфузории к нефтезагрязнениям?
10. Каким образом используются раковинные амёбы в качестве биоиндикаторов нефтезагрязнений?
11. Каким образом используются раковинные амёбы в качестве биоиндикаторов минерализации почв?
12. Каким образом используются раковинные амёбы в качестве биоиндикаторов загрязнений почв бензином и дизельным топливом?
13. Какова шкала устойчивости гидробионтов к нефтезагрязнениям?
14. Какова устойчивость рыб к нефти?
15. Каким образом используют рыб в качестве биоиндикаторов загрязнений водных экосистем?
16. Какова устойчивость гидробионтов к нефтезагрязнениям?
17. Назовите особенности устойчивости рыб к нефтезагрязнениям.
18. Каким образом коловратки используются в качестве биоиндикаторов антропогенных загрязнений?
19. Какие бывают уровни загрязнений донных сообществ?

20. Как проводят биоиндикацию донных нефтезагрязнений?
21. Как происходит самоочищение донных экосистем?
22. Каким образом моллюски используются в качестве биоиндикаторов нефтезагрязнений?
23. Каким образом моллюски используются в качестве биоиндикаторов нефтепродуктов в водоемах?
24. Какие виды животных являются указателями загрязнений пресноводных экосистем?

Глава 3. Биоиндикация физических загрязнений

3.1. Тепловое загрязнение

К физическим загрязнениям относятся тепловые, электромагнитные, радиоактивные, световые и звуковые. Тепловое загрязнение среды появляется в результате избыточной теплоты, получаемой при использовании искусственных источников энергии, и парникового эффекта. Избыточная теплота существенно влияет на энергетический баланс экосистем. Нагревание речных вод в ближайшее время станет чрезмерным, если по-прежнему будет использоваться вода для охлаждения конденсаторов электростанций в системах с открытым циклом. Расчеты показывают, что к 2030 г. во Франции при сохранении темпов роста производства электроэнергии температура воды всех рек увеличится примерно на 10 °С. Потребность США в пресной воде для производства электроэнергии атомными станциями составит в 2030 г. 40 % всех поверхностных проточных вод этой страны.

Температура является одним из важнейших факторов, влияющих на выживание растений и животных. Для каждого вида существует свой интервал температур, порой довольно узкий, наиболее благоприятный для обитания. Большинство водных организмов обладает температурой тела, близкой к температуре окружающей воды. Организмы, которые неспособны перемещаться (растения, взрослые устрицы и др.), находятся в полной зависимости от внешней температуры. Дополнительная теплота от электростанции нередко превышает температурный порог нормального существования организмов. Повышение температуры приводит к уменьшению концентрации кислорода в воде, к активизации процессов брожения в загрязненных водоемах. В воде уменьшается содержание растворенного азота и углекислого газа.

Нагревание воды снижает видовое разнообразие флоры и фауны водоемов. Увеличение температуры воды на 10 °С в 2,5 раза снижает видовое разнообразие диатомей. С повышением температуры снижается количество растворимого кислорода, происходит смена видов: при 25 °С диатомовые водоросли заменяются хлорофитами, последние — синезелеными водорослями, которые имеют низкие пищевые свойства и аккумулируют токсические вещества.

У хладнокровных животных при повышении температуры воды на 10 °С в 2,2 раза увеличивается скорость метаболизма. Тепловая гибель рыб — сравнительно редкое явление, но менее очевидные эффекты имеют более серьезные последствия. Температура существенно влияет на репродуктивные функции. Лососевым, сиговым рыбам необходимы низкие температуры воды для формирования яйцеклеток и спермиев. Взрослые особи способны выжить в теплой летней воде, но не будут размножаться. Еще один эффект действия высоких температур состоит в том, что рыбы теряют способность находить пищу и в результате погибают. В поведении рыб под действием теплового шока могут происходить изменения, позволяющие хищникам легко хватать их. Рыбы, подвергшиеся тепловому шоку, более чувствительны к болезням. Кроме того, при тепловом загрязнении повышается активность паразитирующей фауны. В конечном счете все эти эффекты ведут к уменьшению видового разнообразия животных организмов в водоемах.

В качестве биоиндикационных показателей теплового загрязнения водоемов можно рекомендовать появление и рост синезеленых водорослей, смену видов донных сообществ, сокращение видового разнообразия и доминирование карповых видов рыб.

3.2. Электромагнитные загрязнения

Интенсивно увеличивающийся уровень электромагнитных полей вызывает беспокойство не только у специалистов. Рост количества телевизионных каналов, компьютеров, сотовых телефонов и других электронных средств связи привел к созданию в последние 50 лет новой электромагнитной среды, не характерной для биосферы. Известно, что эволюция биосферы на протяжении 3,5 млрд лет проходила в естественном низкочастотном диапазоне электромагнитных полей (ЭМП). Современное антропогенное повышение электромагнитного фона идет в высокочастотном и сверхвысокочастотном диапазонах¹.

Электромагнитные поля промышленной частоты 50—60 Гц, которые излучают подстанции, электроустановки, линии электропередачи, занимают больше 5 % поверхности суши. Сформировавшиеся волны без существенного затухания многократно огибают Землю, суммируясь друг с другом и создавая самые причудливые конфигурации по напряженности и частоте. Радиоволны, превышающие естественный фон в 100 и 1000 раз, неоднократно огибают Землю благодаря наличию волновода «Земля — ионосфера». Телевизионные станции в каждом городе излучают ЭМП в высокочастотном диапазоне в зависимости от своей мощности на подвластные им регионы. Метрологические, обзорные, авиационные и военные радиолокационные станции излучают в диапазоне 3109—31011 Гц. Каждое государство с помощью радиолокационных станций отслеживает свои воздушные границы, взаимнообразно облучая территории друг друга. Станции наведения баллистических ракет и системы ПВО круглосуточно осуществляют боевое дежурство в сверхвысоком диапазоне частот. Спутниковое телевидение,

¹ *Карташев А. Г., Большаков М. А.* Основы электромагнитной экологии. Томск: Изд-во ТГУ, 2005.

сотовая телефония, коротковолновые передатчики служебного и личного пользования создают электромагнитный смог, который распространяется на всю биосферу и повышается с каждым годом. Естественно, что экологическая оценка влияния ЭМП возможна только по уровням интенсивности ЭМП между различными районами. Наиболее высокий уровень и широкий частотный диапазон ЭМП концентрируется в больших городах и влияет на психику людей, сердечно-сосудистые, онкологические заболевания и т. д. Можно говорить об «электромагнитной наркомании», допинговой дозе ЭМП, иначе трудно объяснить телефоно-, телевизор- и компьютероманию.

Широкое распространение компьютерной техники привело к комплексному облучению ЭМП подрастающего поколения и наиболее интеллектуальной части человечества. При работе дисплеев совместно с излучением оптического диапазона генерируются электростатические поля, ультразвук и ЭМП радиочастотного диапазона. При сравнительно небольшой общей энергии радиочастотная область дисплеев характеризуется широким спектральным диапазоном (10 кГц — 26 ГГц). Хроническое влияние ЭМП дисплеев приводило к развитию функциональных расстройств, среди которых головные боли, утомляемость, нарушения артериального давления, онкологические заболевания, катаракты, зудящая сыпь на коже и шелушения на лице.

При оценке экологической роли ЭМП используется гигиенический подход, основанный на определении биологической эффективности условно выделенных частот для организма человека. Влияние на организм человека ЭМП считается неблагоприятным при физиологических отклонениях, статистически достоверно отличающихся от контрольных показателей и превышающих пределы 26 % колебаний показателей для данного периода года. К

неблагоприятным изменениям относят стойкие, сохраняющиеся в течение месяца отклонения, находящиеся в пределах физиологической нормы; скрытые нарушения равновесия организма с внешней средой типа сужения адаптационных возможностей, выявляемые с помощью функциональных проб.

Следовательно, при гигиеническом нормировании ЭМП оценочными критериями их действия на организм являются функциональные компенсаторные изменения. Когда уровень воздействия поля приводит к патологическим нарушениям, сокращается время пребывания человека в таких условиях. Экологическое нормирование рассматривает хроническое влияние ЭМП на биосистемы при постоянном действии поля, разрушая наиболее неустойчивые виды организмов.

Все электромагнитные поля в водной среде распространяются в виде токов различной частоты. Максимальные значения силы тока наблюдаются при пересечении ЛЭП рек, озер и других водоемов. Негативное влияние электромагнитного излучения наблюдалось на нерестилищах, так как икра очень чувствительна к воздействию тока. Существенный вклад в электромагнитное загрязнение вносит электрокоррозионная защита нефтепроводов и газопроводов, нарушающая миграцию проходных и полупроходных видов рыб. Нарушение состояния рыб, естественного хода их миграции и нереста снижает воспроизводительную функцию и численность потомства. Сопоставление мест подводных пересечений магистральных газо- и нефтепроводов в пределах Томской области и сроков преодоления этих участков рыбой показало, что наибольшую опасность эти объекты представляют для миграции рыбы в небольших реках. В процессе подъема из Обской губы на нерестилища более 50 % мигрирующих особей вынуждено преодолевать преграды. Проведенные исследования указывают на

необходимость комплексного изучения хронического влияния электрического тока и электромагнитных полей ЛЭП сверхвысокого напряжения, пересекающих водные биоценозы, на поведение, миграцию и размножение промысловых и ценных пород рыбы.

Под ЛЭП-500 наблюдались отклонения в поведении птиц и животных. Электромеханические эффекты на покровах возникают и у позвоночных животных. Такой способ восприятия низкочастотных электрических полей характерен для многих позвоночных, в том числе человека. Электромеханические эффекты отмечались у растений, угнетали их рост и развитие, нарушали естественную ориентацию стебля.

Электромагнитное влияние ЛЭП-500 на биосистемы подтверждает серия показателей. Мелкие птицы облетают токонесущие провода на расстоянии около 1 м. Крупные птицы пытаются иногда присесть на токонесущий провод, но никогда на него не садятся. Под проводами ЛЭП в скворечниках уменьшается кладка яиц, увеличивается эмбриональная и постэмбриональная смертность, изменяется динамика развития птенцов, что приводит к снижению успешности гнездования на 8—12 %. Кровососущие насекомые меньше нападают на человека. У мышинного горошка на 16 % повышается частота встречаемости недоразвитых соцветий и на 15—27 % чаще нарушается микроспорогенез.

Наблюдались случаи тератогенеза девясила и гравилата под ЛЭП-500. Отмечались эллипсоидные движения у тычинок ряда цветов, растущих под проводами. Электрическое поле ЛЭП влияло на характер движения летающих насекомых, которые, попадая в зону 30—50 см от проводов, меняли направление полета, а залетая под провода, теряли способность к полету и падали вниз. Наиболее вероятной причиной всех отмеченных феноменов является электромеханический эффект. Выявлены

изменения в поведении пчелиной семьи. Рабочие особи в ульях под ЛЭП возбуждались, возрастал звуковой фон гнезда, на 1—2 °С повышалась температура воздуха в улье, что приводило к росту в 3—6 раз концентрации CO₂. Повышалась агрессивность пчел и падал медосбор. При строительстве сотов активизировалось прополисование улья и увеличивалась частота роения, происходило снижение веса фуражиров и увеличивалась их смертность.

Как правило, незначительное искажение сигнала, вызванное колебанием рецепторных органов — антенн в электрическом поле, приводило к нарушению реальной картины окружающей обстановки, что сказывалось на поведении насекомых, стремящихся покинуть опасную зону или совершить посадку. Летающие насекомые должны обладать большей чувствительностью к электрическим полям по сравнению с нелетающими обитателями травяного яруса и почвенных горизонтов. Необходимо учитывать морфологию покровов представителей конкретного вида и значение для них тактильной рецепции.

Антенны, которыми воспринимают электрические поля пчелы, тараканы, комары, в качестве специализированного механорецепторного органа участвуют в анализе среды при выборе направления движения. Антенны отличаются не только разной чувствительностью к деформациям, но и способностью различать воздействия по силе. Орган, воспринимающий отклонение антенны у комаров в низкочастотном диапазоне, обладает чувствительностью порядка 5—10 дБ. Представители данной группы способны к восприятию градиентов электрических полей и избегают пространства с высокими напряженностями поля.

Несмотря на большое количество изменений под ЛЭП, можно выбрать наиболее точные биоиндикаторы электрических полей. Показательным является прерванный полет бабочек под ЛЭП в солнечный день. Бабочки подлетают к проводам, под влиянием наведенного

электрического поля крылья у них схлопываются, они падают на траву, разряжаются и продолжают полет. К биоиндикационным тестам можно отнести относительную немногочисленность гнездящихся под ЛЭП птиц, скопление рыб в областях пересечения водоемов ЛЭП, коррозионной защиты газо- и нефтепроводов, нарушение их естественной миграции.

При биотестировании переменного низкочастотного магнитного поля можно использовать эффект магнитофосфена, когда при напряженности магнитного поля, равной 200 Э, и частоте 10—20 Гц человек с закрытыми глазами видит вспышки света, что определяет предельно допустимый уровень переменных магнитных полей для людей.

В качестве биоиндикаторных органов человека и животных рассматриваются шоковые органы, наиболее чувствительные к электромагнитным излучениям: центральная нервная система, сердечно-сосудистая система, сперматогенез, хрусталик и сетчатка глаза.

Установлено, что эпидемиологическая и онкологическая обстановка в районе релейных станций, станций ПВО и наведения стратегической авиации и межконтинентальных ракет является неблагоприятной. В таких районах наблюдались нарушения в миграции птиц и животных, массовое выбрасывание на сушу китов и т. д.

У людей, живущих вблизи высоковольтных ЛЭП, чаще встречаются лейкозы, опухоли мозга и другие заболевания. При воздействии сверхвысоких излучений (СВЧ) возможно развитие катаракты, отслоение сетчатки глаза, нарушение функций щитовидной железы. Глубина проникновения СВЧ-излучения в ткани, содержащие большое количество воды, значительно меньше, чем в ткани, содержащие липиды. Под влиянием нетепловых доз СВЧ у людей отмечались невроты, головные боли, нарушения сна и артериального давления.

У жителей районов с высоким уровнем ЭМИ и у людей, злоупотребляющих средствами электронной связи, повышается частота сердечно-сосудистых заболеваний (стенокардия, инсульты, тромбообразования), онкологических заболеваний головного мозга, катаракты глаз, импотенции и бесплодия.

3.3. Радиоактивное загрязнение

Антропогенное изменение радиэкологической ситуации произошло в течение относительно короткого периода времени — около 70 лет. Введение в биосферу большого количества естественных и искусственных делящихся элементов в глобальном и региональном масштабах привело к концентрации их в пищевых цепях, непосредственно используемых человеком¹.

В настоящее время в природную среду поступило большое количество радионуклидов, больше 60, извлекаемых из недр Земли вместе с углем, нефтью, газом, минеральными удобрениями, строительными материалами. В результате хозяйственной деятельности человека создано несколько сотен искусственных радионуклидов. Подсчитано, что при получении урана образуется значительное количество радиоактивных отходов. Отходы будут оставаться радиоактивными в течение миллионов лет и являются главным источником облучения людей.

Радионуклиды, попавшие в живой организм, называются инкорпорированными. Находясь в течение некоторого времени в органах и тканях, радионуклиды создают внутреннее облучение живого организма. Поглощенная доза при внутреннем облучении может быть сопоставима с биологическими последствиями, и в этом смысле она выступает в качестве меры радиационной опасности тех

¹ Карташев А. Г. Биосфера и человек. Томск: Изд-во ТГУ, 2003.

радиоактивных веществ, которые, находясь во внешней среде, могут попасть внутрь организма. Вполне понятно, что на величину дозы влияют вид и энергия ионизирующего излучения, испускаемого радионуклидами.

Для представителей животного мира существуют три главных пути попадания радионуклидов из внешней среды: пероральный путь через органы пищеварения, ингаляционный путь через органы дыхания и резорбция через кожу. Загрязнение растений радионуклидами происходит в основном через корневую систему. Наиболее интенсивно в биологический круговорот включаются такие радионуклиды, как тритий, С-14, Р-32, S-35, К-40, Са-45, Fe-55, Sr-90, Cs-137, радиоизотопы йода. Активно внедряются в живые организмы радионуклиды семейств урана и тория. Накапливаясь в растениях, они по пищевым цепям поступают в ткани и органы животных и человека, вызывая внутреннее облучение. Особенно опасны инкорпорированные радионуклиды для растущих и молодых организмов.

Например, Sr-90, который близок по химическим свойствам с кальцием, переходит из растений в организм коровы, с молоком или молочными продуктами поступает в организм человека и накапливается в костной ткани и костном мозге, вызывая опухоли костей и лейкозы. Перенос стронция из почвы в костную систему человека осуществляется с коэффициентом, равным 7,6 %. Скелетными радионуклидами являются также уран, радий, свинец. Вместе с растительной пищей в организм человека поступает близкий по химическим свойствам к калию Cs-137, который с коэффициентом, равным примерно 3 %, накапливается в печени и в половых железах, что приводит к возникновению наследственных изменений в потомстве. В щитовидной железе, особенно при дефиците в ней йода, интенсивно накапливаются радиоизотопы йода, вызывая ее разрушение или рак; щитовидным радионуклидом является

также технеций. Тритий, радиоуглерод, калий и многие другие радионуклиды равномерно распределяются в организме. Большое количество радионуклидов поступает в организм человека и животных вместе с пищей не только из наземных, но и из водных экосистем, которые загрязняются как глобальными выпадениями радиоактивных изотопов, так и сбросовыми водами предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Некоторые радионуклиды — Sr-90 и Cs-137 — сравнительно легко выщелачиваются из почв, загрязняя при этом подземные воды, которые могут использоваться для питьевого водоснабжения. В водных системах преимущественную роль играет процесс биоаккумуляции, который может быть интенсивным. Исследование рыбы реки Колумбия показало, что концентрация радиоактивного фосфора-32 ($T_{1/2} = 14,3$ суток) в тканях рыб в 5000 раз выше, чем в самой реке. Установлено также, что морской фитопланктон аккумулирует радиоактивные вещества с коэффициентом накопления, равным 104.

Для оценки вредного влияния радионуклидов после попадания в организм человека используется биологический период полувыведения, в течение которого половина массы изотопа выделяется из организма (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Значения физического периода полураспада $T_{\text{физ}}$ и биологического периода полувыделения $T_{\text{биол}}$ для некоторых радионуклидов

Радионуклиды	$T_{\text{физ}}$	$T_{\text{биол}}$	$T_{\text{эфф}}$	Вид излучения
H-3	12,26 лет	19 дней	19 дней	β^-
C-14	5730 лет	35 дней	35 дней	β^-
P-32	14,3 дня	10 лет	14,1 дня	β^-
K-40	1,28·10 ⁹ лет	17 дней	37 дней	β^- , β^+
Ca45	165 дней	50 лет	163,5 лет	β^-
Sr-90	28,1 года	11 лет	7,9 лет	β^- , γ

Радионуклиды	$T_{\text{физ}}$	$T_{\text{биол}}$	$T_{\text{эфф}}$	Вид излучения
I-131	8,07 дня	138 дней	7,6 дня	β^- , γ
Cs-137	30,32 года	70 дней	69,6 дня	β^- , γ
Ba-137	12,8 дня	200 дней	12 дней	β^- , γ
Rn-222	3,8 дня	—	—	α
Ra-226	1600 лет	55 лет	53,2 года	α , γ
U-233	1,62·10 ⁵ лет	300 дней	300 дней	α , γ
Pu-239	2,44·10 ⁴ лет	120 лет	120 лет	α , γ

Здесь $T_{\text{эфф}}$ — период в течение которого ткани организма человека подвергаются облучению радионуклидами. Определение $T_{\text{эфф}}$ для различных организмов и экосистем представляется одной из приоритетных задач современной радиоэкологии. Необходимо отметить, что при попадании радионуклидов в экосистемы происходит значительное снижение их удельной радиоактивности. После

радиационной аварии на уральском комбинате «Маяк» в 1957 г. произошло загрязнение озер, расположенных в Восточно-Уральском заповеднике. Осенью 1957 г. уровень радиоактивности в одном из озер превышал фоновые значения в 2600 раз, в другом — в 1400 раз. Летом 1958 г. превышение составляло 370 и 1000 раз соответственно. Снижение радиоактивности воды происходило вследствие распада короткоживущих изотопов, химической трансформации и сорбции в донные отложения и илы более 90 % радионуклидов. В течение последующих 3—5 лет наблюдались уменьшение удельной радиоактивности в связи с дезактивацией короткоживущих радионуклидов, интенсивный смыв с водосборных территорий в водоемы, закрепление изотопов в донных отложениях, почвах и инкорпорация в биосистемах. В течение последующих 40 лет и более радиоактивность водоемов определяется в основном долгоживущими элементами — ^{90}Sr и ^{137}Cs . Устанавливается динамическое распределение радионуклидов в компонентах водного биоценоза. Наблюдается медленное снижение активности и более глубокое проникновение делящихся элементов в донные отложения

Максимальное накопление радионуклидов осуществляется многолетними водорослями и донными отложениями. Накопление загрязнений прибрежной растительностью обусловлено стоками с водосборных бассейнов. Значительное увеличение концентрации радионуклидов в пищевых цепях способствует очищению воды стоячих водоемов и распределению изотопов в экосистеме. Биопродуктивность таких водоемов, в том числе и открытых отстойников жидких ядерных отходов, несколько снижается в период непосредственного загрязнения, восстанавливается через некоторое время и во многих случаях превышает первоначальную. Для всех гидробионтов в зоне радиоактивного загрязнения

отмечались повышенная эмбриональная смертность, аномалии развития, цитогенетические нарушения, снижение средней продолжительности жизни и т. д. В то же время численность популяций существующих видов была высокой. На таких озерах, как правило, успешно селятся и размножаются перелетные водоплавающие птицы, остающиеся зимовать, если озера-отстойники не замерзают в связи с регулярным сбросом в них теплых разбавленных радиоактивных отходов.

Относительно высокая численность популяций животных в радиоактивных резервациях объясняется, во-первых, адаптивными способностями быстро размножающихся видов с относительно высокой скоростью смены поколений; во-вторых, отсутствием антропогенного влияния, так как водоемы с радиоактивной загрязненностью и прилегающие к ним территории являются запретными зонами или районами с ограниченным доступом для людей. Естественно, что на эти территории осуществляется активная миграция животных и идет популяционно-видовой отбор на радиорезистентность.

Большую опасность в качестве разносчиков радионуклидов представляет собой мигрирующее птичье население, которое гнездится на загрязненных водоемах, питается в течение летнего сезона биопродуктами с повышенной концентрацией изотопов и в осенний период разносит изотопы далеко за пределы этих водоемов.

Распределение радионуклидов в биогеоценозах несколько отличается по характеру миграции от водных экосистем. В качестве депо делящихся элементов служит почва, высокая концентрация характерна для растительности. В бедных биогенными элементами почвах (тундра, степные ландшафты) в трофических цепях экосистем накопление радиоизотопов происходит интенсивнее, чем в насыщенных. В зависимости от типа почв и количества атмосферных осадков меняется

накопление радионуклидов при локальных и глобальных выпадениях.

Максимальное количество загрязнений выпадает в зоне с большим количеством среднегодовых осадков и концентрируется в корнеобитаемых слоях — 0—15 см. Интенсивное накопление стронция-90 характерно для мхов, багульника, черники, кислицы, сосны, осины, в то время как максимальная аккумуляция цезия характерна для мхов и лишайников. Известно, что хвойные породы деревьев содержат повышенное количество радиоактивных элементов, поступающих при атмосферных осадках, поэтому хвойные используются в качестве биоиндикаторов радиоактивного загрязнения.

Накопление радионуклидов животными зависит от места их обитания и от характера питания. Стронций-90 аккумулируется животными, активно потребляющими кальций, цезий-137 преимущественно накапливается позвоночными животными. Необходимо отметить, что ускоренной миграции радионуклидов в почвенном слое экосистем способствуют роющие животные, дождевые черви и вспашка сельскохозяйственных угодий. В среднем накопление стронция-90 в трофических цепях почвенных сапрофагов и растительноядных насекомых происходит практически одинаково в различных климатических зонах, в то время как цезий-137 более интенсивно аккумулируется в смешанных лесах на дерново-подзолистой почве. По оценкам специалистов, животные в среднем накапливают в гумидных зонах 0,006—0,016 %, в аридных — 0,00003—0,0006 % радиостронция, 75—87 % которого от всей зоомассы приходится на беспозвоночных животных: кивсяков, мокриц, дождевых червей, сухопутных моллюсков. Позвоночные животные накапливают ^{90}Sr , около 16 % в смешанных лесах, 11 % — в широколиственных. Цезий-137 составляет от 0,003 до 0,005 % в гумидных и 0,00002—0,0004 % в аридных зонах от

общей зоомассы. Дождевые черви и насекомые накапливают от 56 до 92 % цезия.

Наиболее устойчивой к действию радиации в биогеоценозе является почвенная микрофлора, стерилизация которой наблюдалась при дозах больше 1000 кР, грибы поражались при уровне выше 8 кР. В то же время нарушения половой системы и развития молодых организмов происходили при более низких дозовых нагрузках (10—20 % от ЛД₅₀), что и приводило к снижению численности популяций.

Необходимо отметить, что травянистые растения в среднем в 10 раз более устойчивы к радиации, чем деревья. Например, ЛД₅₀ составляет 380—1200 Р для сосны, для лиственных пород — порядка 2000—10 000 Р. К наиболее радиорезистентным относятся мхи, водоросли, лишайники и грибы. Таким образом, повышение уровня радиоактивных загрязнений приводило к деградации биоценозов, элиминации эволюционно более молодых видов растений и животных. Распределение поступивших в организм элементов зависит от типа радиоизотопов и скорости их поступления.

В природных биоценозах наибольшему воздействию облучения из млекопитающих подвергаются мышевидные грызуны. При плотности дозы загрязнения 70—125 МБк/м² и мощности дозы инкорпорированного излучения 10–3—10–2 Гр/сутки наблюдалась повышенная смертность у полевок, увеличивалась эмбриональная гибель, сокращалась продолжительность жизни, возрастала изменчивость морфофизиологических признаков. Анализ динамики численности грызунов в зоне Чернобыльской аварии, подвергшихся длительному хроническому облучению, выявил изменения темпа мутационного процесса, показателей структуры популяций, что привело к радиоадаптации и элиминации радиочувствительных популяций и видов. В связи с тем, что средняя

продолжительность жизни мышевидных грызунов составляет около 1 года, морфофизиологические нарушения не оказывали существенного влияния на численность популяций.

Таким образом, можно выделить основные биоиндикационные изменения живых организмов при радиоактивном загрязнении экосистем: снижение численности радиочувствительных видов, видового разнообразия наземных и водных сообществ; формирование относительно упрощенных и устойчивых к радиозагрязнению биоценозов; постепенное в зависимости от снижения радиоактивности развитие восстановительных сукцессионных процессов. Снижение численности и нарушение структуры радиочувствительных популяций происходит в результате изменений в системе воспроизводства: эмбриональная смертность, терратогенез, нарушения в системе оогенеза, сперматогенеза и стерильность, которая компенсируется смещением периодов половой зрелости к ювенальным стадиям.

Повышение генетической и морфофизиологической изменчивости особей является адаптивной реакцией. Наблюдались биоиндикационные морфологические отклонения соматического и генетического типа: онкологические заболевания, врожденные недоразвития конечностей, ерошение чешуи, пучеглазие, недоразвитие и аномалии соцветий, листьев и стеблей. Достаточно распространенными являются аномальная пигментация, альбинизм, карликовость и гигантизм у растений. У млекопитающих наблюдались нарушения в системе крови, репродуктивной, дыхательной, эндокринной системах, в надпочечных, щитовидной и половых железах, в печени и почках.

В связи с тем, что радиоизотопы накапливаются в верхнем слое почвы, плоды фруктовых деревьев, корни которых находятся глубже, мало подвержены загрязнению.

В черноземах накопление в растениях радиоизотопов происходит меньше, чем в торфоболотистых, песчаных и подзолистых почвах. Интенсивно накапливают радиоактивные элементы лишайники, мхи, грибы, бобовые, злаки, укроп, петрушка, шпинат, виноград и т. д.

Биомониторинг, как и радиационный контроль, необходимо проводить по периметру ядерного объекта в трех основных зонах с периодичностью не реже одного раза в месяц. Биологические тест-объекты выбирают в зависимости от биоценозов, формирующихся в районе наблюдения. Прежде всего, это растения: хвойные как наиболее чувствительная к радиационному поражению группа растений, многолетние и однолетние травянистые растения. Млекопитающие — мышевидные грызуны и насекомоядные. Птицы — гнездовая экология мигрирующих и оседлых птиц, наблюдения за отклонениями в развитии птенцов. Амфибии и рептилии — в качестве индикаторов уровня прибрежной загрязненности водоемов. Беспозвоночные почвенной мезофауны — обитатели подстилки поверхности почвы, наиболее интенсивно аккумулирующей радиоизотопы: дождевые черви, муравьи и остальные герпетобионты. Паукообразные — свободные охотники и тенетники, паутина которых способна накапливать радиоактивные аэрозоли, а пауки, являясь хищниками, — аккумулировать инкорпорированные радионуклиды.

В качестве биоиндикаторов хорошо зарекомендовали себя ловчие сети пауков-крестовиков, изменение структуры которых связано с нарушением поведения пауков в зависимости от величины дозы облучения.

В связи с тем, что основным накопителем радионуклидов является гидросфера, биомониторинг водоемов представляется одним из важнейших компонентов экологического контроля. Радионуклиды, накапливаясь в донных отложениях, распространяются по пищевым цепям и создают долговременную опасность радиоактивного загрязнения водных систем. По степени деградации донных сообществ можно судить о величине суммарной радиоактивной дозы аккумулированных радионуклидов. Комплексный анализ данных мониторинга территорий позволяет оценивать текущую радиоэкологическую ситуацию и прогнозировать отдаленные последствия.

Основными биоиндикационными показателями радиозагрязнений являются частота онкологических заболеваний, тератогенез и генетические мутации. Систематический анализ состояния здоровья населения является хорошим биометрическим показателем радиоактивного загрязнения местности и должен охватывать более 50 % проживающих по всем основным типам заболеваний: онкологических, сердечно-сосудистых, эндокринных, психологических, врожденных аномалий развития, цитогенетических, иммунных и т. д.

Контрольные вопросы

1. Какие биоиндикаторы тепловых загрязнений существуют?
2. Как осуществляется биоиндикация электромагнитных загрязнений?
3. Как осуществляется биоиндикация радиоактивных загрязнений?

Глава 4. Биопрогнозирование экологических катастроф

4.1. Биопрогнозирование землетрясений

Под экологическими катастрофами подразумеваются относительно быстрые разрушительные изменения среды обитания, приводящие к гибели живых организмов, деградации экосистем и изменению ландшафтной структуры. Рассматривают природные и антропогенные экологические катастрофы. К природным экологическим катаклизмам относятся климатические кризисы, засухи, наводнения, пожары, оползни, ураганы, землетрясения, вулканическая деятельность. К антропогенным — разрушения природной среды, вызванные деятельностью человека: кислотные дожди, химические загрязнения, разливы нефти, аварии на атомных станциях и т. д. Как природные, так и антропогенные катаклизмы дифференцируются на прогнозируемые, имеющие подготовительную низкоэнергетическую стадию, которая воспринимается биосистемами в качестве сигнальной информации, и непрогнозируемые. К последнему типу катастроф отнесены пожары, нефтяные аварии, сбросы токсических отходов, чрезвычайные ситуации на атомных станциях¹.

Природные катаклизмы, как правило, характеризуются подготовительной стадией и способны восприниматься биосистемами. В качестве биоиндикаторов используются виды-указатели, чувствительные к каждому типу природных катаклизмов. Исследования в данном направлении немногочисленны и сконцентрированы в области предсказаний землетрясений.

¹ *Карташев А. Г.* Биоиндикация экологического состояния окружающей среды. Томск : Водолей, 1999.

Вероятно, система выживания биообъектов будет аналогична той, которая произошла бы в случае реализации событий. Спящие организмы проснулись бы, находившиеся в убежищах, угрожающих их жизни (норах, пещерах, дуплах), покинули их. Растения постарались бы отцвести, животные — либо вывести свое потомство, либо отказаться от размножения в данном регионе и т. д.

Возможны следующие предстартовые биологические изменения:

- поведение животных хаотичное, беспокойное;
- нарушается колебательный характер биоритмических процессов: суточных,

сезонных, они становятся импульсными, прерывистыми по мере приближения к критическим событиям; животные, залегшие в спячку, проснулись бы или не ложились в спячку;

- нарушаются компоненты миграционного поведения животных;
- среди животных появляются и начинают широко распространяться стрессовые реакции;
- изменяются алгоритмы гнездовой экологии биообъектов в направлении как ускорения, так и замедления;

• весь комплекс предстартовых изменений приводит к увеличению уровня дисперсии показателей экосистемы;

• изменяется видовое разнообразие экосистем как в сторону увеличения при внедрении мигрантов, так и в сторону снижения коренных видов.

В районах с повышенной экологической опасностью необходима организация биоиндикационного мониторинга.

Рассмотрим биопрогнозирование распространенной экологической катастрофы — землетрясения. На протяжении всей эволюции биосферы происходили

землетрясения. Катаклизмы влияли на все живое и, возможно, биосистемы выработали алгоритмы адаптации к ним и их прогнозирования.

Под прогнозом понимается предсказание места и времени землетрясений, их возможной силы и характера проявления на поверхности Земли. Поиски предвестников землетрясений — современный этап развития сейсмологии. Большое значение придается геолого-геофизическим исследованиям, требующим проведения точных и непрерывных измерений вариаций физических полей и свойств земной коры, ее деформации, магнитоэлектрических процессов и пр.

Отдельные указания на необычное поведение некоторых классов, видов и особей животных, особенно птиц и млекопитающих, можно найти в старой европейской литературе. Наибольшее количество — тысячи случаев — наблюдений за аномальным поведением животных, преимущественно сухопутных, перед землетрясением собрано к настоящему времени в Китайской Народной Республике. Наблюдения относятся к 68 видам животных, главным образом, домашних. Аномальное поведение животных на территории Китая отмечено перед несколькими десятками землетрясений с магнитудой от 4,7 до 8,5. Слежение за аномальным поведением животных — интегральная часть сейсмопрогностической программы КНР.

Из японских источников известны многочисленные случаи аномального поведения водных организмов перед сильными землетрясениями: зубаток, трески, сардин, тунцов, пеламид, акул, гольцов, угрей и других обитателей моря — крабов, омаров, осьминогов, трепангов, каракатиц, планктона. В Японии имеются данные о предвестниках в поведении многих видов сухопутных животных.

В нашей стране известно более сотни научных публикаций, посвященных разным аспектам проблемы

биосейсмопрогноза, не считая публикаций с описанием отдельных случаев необычного поведения животных перед землетрясениями. Таких землетрясений на территории нашей страны известно около 50, причем число их резко возросло в 1970—1980-е гг. Видимо, произошло повышение внимания к аномальному поведению животных перед землетрясениями в СНГ..

В отличие от сейсмических и других инструментальных данных о предвестниках землетрясений, сведения о биопредвестниках разнообразны. К источникам биопредвестниковой информации можно отнести мифы и легенды, местные поверья, пословицы и поговорки, сведения из древних текстов, летописей, античной, средневековой и более поздней литературы. Источниками информации служат данные исследований ученых, включая специальные опросы населения после землетрясений, материалы наблюдений на экспериментальных биостанциях, биополигонах и сведения местных жителей и случайных очевидцев. Соотношения видов информации, из которых складывалось общее представление о количестве и качестве наблюдавшихся случаев биопредвестников, различаются для разных стран и территорий. В Японии издан ряд книг, опубликованы статьи, где подробно описаны многочисленные случаи наблюдений неспециалистами и учеными аномального поведения животных не менее чем перед 25 сильными землетрясениями, происшедшими в XIX и XX вв.

После проведения в США первой конференции по аномальному поведению животных перед землетрясениями в Японии наметилось усиление внимания к биопредвестникам, и в программу работ японских ученых по предсказанию землетрясений, наряду с изучением многих геофизических, геохимических и других предвестников, включено исследование поведения сухопутных животных, рыб и растений. Иное положение

сложилось в Китае. После сильного землетрясения с $M = 6,8$ в округе Хеингтан провинции Хопей в Северном Китае в 1966 г., перед которым все собаки покинули свои конуры и тем самым спаслись, китайские ученые провели исследование в национальном масштабе вариаций поведения животных перед землетрясениями. Они обследовали места, в которых произошли землетрясения в первой половине XX в. Опросив стариков и собрав информацию из большинства доступных источников, они представили предварительный доклад, касающийся 58 видов домашних и диких животных, которые проявили необычное поведение перед землетрясениями.

С 1968 г. современная биопредвестниковая информация начала накапливаться на открытой в провинции Хопей первой экспериментальной станции прогноза землетрясений, где использовались биологические наблюдения. Вторая станция была создана в провинции Синхянг в 1971 г. С 1972 г. дополнительным источником огромного объема биопредвестниковой информации стали многочисленные группы добровольцев-непрофессионалов, работающих в тесной координации со специалистами по прогнозу землетрясений Государственного сейсмологического бюро Китая.

В Китае проводились опросы населения после сильных землетрясений с целью обнаружения предшествовавших явлений, в том числе биопредвестников. Таким образом, общий массив информации о биопредвестниках состоит из двух типов данных: собранных до событий и после них.

В России пока не опубликовано специальной полной сводки сведений о биопредвестниках землетрясений, произошедших на нашей территории за всю историю страны. Единственная попытка такого рода была предпринята в начале 1980-х гг.

А. А. Никоновым (1981, 1982). В результате целенаправленных поисков ему удалось собрать из разных

литературных источников и путем расспросов достаточно определенные, но не полные и не во всех случаях надежные первичные сведения об аномальном поведении животных перед 21 землетрясением на территории СССР. Все сведения исходят от неспециалистов, местных жителей и случайных очевидцев, получены более или менее случайно, сообщены устно или проникли в печать после события, т. е. относятся к так называемой ретроспективной предвестниковой информации. Объем этой информации к моменту Спитакской сейсмокатастрофы 7 декабря 1988 г. составлял десятки наблюдений. Многие сведения из разных мест и для разных лет аналогичны и вполне согласуются с зарубежными публикациями.

В 1991 г. в Крыму был проведен первый всесоюзный семинар «Биологические аспекты прогнозирования землетрясений», на котором заслушали более 50 сообщений по данной тематике. Европейские ученые, видимо, широко не проводили исследования по использованию животных для прогноза землетрясений, но в отдельных публикациях описываются случаи появления биопредвестников и выдвигаются гипотезы о причинах их возникновения. В европейской и американской литературе нет обобщающих работ по исследованию биопредвестников. В сводках и обзорных работах американские исследователи хотя и приводят данные собственных ретроспективных опросов, все же преимущественно опираются на опыт, накопленный в КНР и Японии. Имеются сведения, что в США были попытки организовать получение перспективной биопредвестниковой информации путем установки специальных телефонов. Люди звонили, как правило, после землетрясений.

Опубликованные в мировой литературе данные, по самым предварительным оценкам, содержат сведения не более чем о 200 землетрясениях, перед которыми наблюдались биопредвестники. Естественно, что реальное

число замеченных людьми случаев значительно больше, чем их попало в литературу. Устные рассказы об аномальном поведении животных перед землетрясениями распространены в Японии, Китае и многих сейсмоопасных районах СНГ.

Имеющаяся в научной литературе информация о биопредвестниках землетрясений весьма неоднородна по качеству. Более того, нет единой методологии ее получения, отсутствует определение, что рассматривать в качестве единицы биопредвестников, не разработаны критерии оценки разных видов и источников информации. Сложность решения вопросов обусловлена тем, что они относятся к областям не только прогностики и геофизики, но и этологии и психологии, как индивидуальной, так и социальной.

Подавляющее число сведений о биопредвестниках землетрясений касается поведения животных. Сведения об аномальном поведении животных можно разбить на три крупные категории. К первой относятся те, где поведение не является адаптивным ни при каких обстоятельствах. Пример — выпрыгивание рыб из воды на берег или на пол, где они неизбежно погибают. Ко второй категории можно отнести поведение, которое нормально при одних обстоятельствах, но совершенно необъяснимо с точки зрения наблюдателя при условиях, когда он его фиксировал, например, дрожание животных без видимых на то причин или бегство из мест обитания в отсутствие видимой угрозы. К третьему классу относится поведение, приписываемое животным как адаптивное к возникновению землетрясений, т. е. поведение, при котором животные могут воспользоваться своим предчувствием готовящегося землетрясения.

Сообщения первой категории о неадаптивном, «сумасшедшем», поведении требуют очень высокого качества свидетельств, чтобы быть принятыми как правдивые. Следует иметь в виду, что реакции, помещаемые

в эту категорию, могут быть адаптивными в обстоятельствах, природа которых пока не ясна. Важно подчеркнуть, что некоторые поведенческие реакции животных перед землетрясениями попадают именно в эту категорию.

Сообщения второй и третьей категорий относятся к реакциям, интерпретированным как адаптивные. Такие реакции могут вырабатываться в ходе эволюции данного вида и в процессе онтогенеза данной особи путем ее обучения. Сильные землетрясения столь редки на протяжении жизни отдельных особей у большинства видов животных, что маловероятно возникновение у них специфических реакций путем научения. Возможно, предвестники землетрясений могут стимулировать закрепление реакций, возникающих путем научения, но перед другими, более частными событиями, предварявшимися такими же или схожими стимулами. К ним можно отнести внезапное наводнение, штормы, ливни с грозами, сели, оползни, лавины и т. д.

Что касается развития адаптивных реакций животных под действием предвестников землетрясений, то тут нет полного понимания природы явления. Очевидно, что сами землетрясения и сопровождающие их явления представляют угрозу для жизни немногих видов животных. Но для этих немногих видов, например глубоководных рыб, подобная угроза могла способствовать выработке реакции или специфической чувствительности к предвестникам землетрясений.

Многочисленные сообщения о всплытии глубоководных рыб к поверхности перед сильными землетрясениями не противоречат подобному предположению. Высказываются гипотезы о наличии у большинства животных специфических реакций на предвестники землетрясений, позволяющих им заранее покинуть места обитания, чтобы пережить приближающуюся катастрофу. Принимая во

внимание, что наземные животные эволюционировали от предков, обитавших в воде, высказывается гипотеза о наследовании ими некоего рудиментарного органа — детектора приближающихся землетрясений. Для большинства видов он может быть биологически незначим в настоящее время, но при условии кодирования в генетическом материале эта способность остается.

Альтернативная точка зрения предполагает, что предвестники землетрясений стимулируют специфические упреждающие реакции через процесс, эволюционно развитый для других целей. Имеется в виду адаптация животных к упомянутым выше более часто повторяющимся природным катаклизмам и к их предвестникам. Здесь мы сталкиваемся с вопросом о возможных источниках ошибок типа «ложная тревога» у биологических предвестников, обусловленных аномальным поведением, не связанным с приближением момента сильного землетрясения. Одним из таких источников может служить появление хищника или добычи, другим — резкое изменение погоды.

Достоверных данных о природе и характеристиках переносчиков и каналов воспринимаемой некоторыми живыми организмами метеорологической информации, имеющей прогностическое значение, очень мало. Кроме известных признаков и примет, накопленных в результате многовекового опыта, опубликовано значительное количество исследований изменений суточной двигательной активности или характера поведения перед ураганами, бурями, штормами, грозами с ливнями, смерчами у пауков, жуков, гусениц, медицинских пиявок, древесных лягушек, вьюнов, гольцов, медуз, некоторых птиц, некоторых бактерий и т. д.

Еще одной причиной ошибок типа «ложная тревога» могут быть изменения на популяционном уровне в результате массовых миграций (миграции грызунов, белок, лягушек и т. п.). Определенную роль могут играть, в смысле

влияния на «фоновый» уровень, эпидемии, пищевые отравления и другие неблагоприятные процессы, которые охватывают массы домашних или диких животных. Чувствительными к изменению мотивационного состояния под воздействием подпороговых специфических раздражителей могут оказаться не только динамические, но и структурные характеристики поведения. Примерами могут служить гнездовое поведение у рыб и птиц, плетение паутины пауками и т. д. Методы, использующие изменения структурных характеристик под действием приближающегося землетрясения, могут дать довольно высокую чувствительность, но они требуют достаточно большого времени для сбора экспериментального материала, кроме того, желательно иметь и фоновые материалы.

С точки зрения быстроты и доступности обнаружения изменений внутреннего состояния животных более удобным является использование динамических характеристик поведения. Поэтому им уделено основное внимание, и под термином «биопредвестники», когда речь идет о животных, понимаются изменения в динамике их поведения. Предполагается, что предвестники землетрясений воспринимаются животными не как специфически интерпретируемые, а как указание на что-то важное (но неизвестное), что должно случиться. Они стимулируют общую мотивацию последующего поведения, появляются реакции готовности к неспецифическим изменениям окружающей среды в ближайшем будущем. Это может выражаться в изменении степени тревожности или в масштабе реакции на другие стимулы, действующие на животных в период неспецифического ожидания.

Анализ имеющейся информации позволяет выделить два основных типа поведенческих реакций животных на приближающееся землетрясение.

Первый тип — изменение общей эмоциональной реактивности животного, не сопровождающееся целенаправленным поведением. Проявление неясной тревоги, беспокойства выражается в повышении двигательной активности, вставании шерсти «дыбом», дрожи, вое, мычании и т. д.

Как правило, такое беспокойство проявляется при землетрясениях со сравнительно небольшой магнитудой или же в районах, удаленных от эпицентра, при больших временах упреждения. Эксперименты с животными показывают, что подобное беспокойство обычно возникает при действии подпороговых интенсивностей раздражителей, связанных с появлением опасности. В этом случае происходит активация соответствующих мотивационных систем, но ее уровень недостаточен для прерывания текущего поведения и запуска адекватных поведенческих реакций.

Второй тип поведенческих реакций связан с возникновением целенаправленного поведения. В большинстве случаев такое поведение обладает всеми характерными признаками реакций, запускаемых при появлении опасности. У домашних животных отмечаются бегство из помещений и попытки спасения собственного потомства; дикие животные покидают норы, другие места обитания и мигрируют из района будущего землетрясения; птицы взлетают в воздух перед толчком.

Таким образом, геофизические предвестники землетрясений, прежде всего, влияют на мотивационные системы животного, активирующие реакцию страха. При этом высказываются предположения о том, что характер поведенческих проявлений зависит от интенсивности действующего раздражителя. Низким значениям интенсивности соответствуют реакции первого типа, более высоким — второго.

Биологические предвестники, по имеющимся данным, могут проявляться перед землетрясениями с магнитудами в интервале от 4 до 8,4, т. е. практически во всем диапазоне ощутимых землетрясений. Животные реагируют на приближающееся землетрясение в областях с интенсивностью будущих сотрясений от 5 до 10 баллов. Аномальное поведение животных проявляется в области предстоящих сильных разрушений. Возможно, этот факт связан с распределением сигналов, на которые реагируют животные, по области подготовки землетрясений и с затуханием их за пределами этой области. Используя биопредвестники для предсказания землетрясений, можно оценить место и примерные размеры области разрушений.

Остается практически не исследованным вопрос о соотношении между пространственно-временными характеристиками биопредвестников и механизмами очагов соответствующих сейсмических катаклизмов. Особого рассмотрения заслуживает вопрос о соотношении между магнитудой готовящегося землетрясения и временем начала необычного поведения животных. Применялись различные подходы, опирающиеся как на оценку общего усредненного времени появления биопредвестников, так и на оценки, сделанные определенным образом для выделенных выборок некоторых совокупностей видов животных.

Первый подход был использован, в частности, при попытке выявить соотношения между M и t для разных групп животных по материалам наблюдений только на территории СНГ. Сопоставление биопредвестниковой информации с обобщенными результатами по остальным предвестникам показывает, что биопредвестники хорошо вписываются в группу краткосрочных предвестников, причем 75 % прогнозов лежит ниже усредняющей эту категорию предвестников кривой, т. е. относятся к области так называемых оперативных предвестников. Следовательно, аномальное поведение животных —

млекопитающих и птиц, может начаться тем раньше, чем больше магнитуа готовящегося землетрясения Второй, дифференцированный, подход был использован при анализе зарубежных данных. Построены графические зависимости числа биопредвестников от времени их появления для обитателей водной среды — рыб, крабов, черепах и т. д., и воздушной среды — млекопитающих, птиц, рептилий.

Максимум кривой для обитателей водоемов смещен в сторону более долгосрочных предвестников относительно аналогичной зависимости для наземных животных, т. е. водные обитатели раньше предчувствуют землетрясения. Величина сглаженных значений проявления биопредвестников для обитателей водной среды близка к двум дням, для наземных животных составляет несколько часов. Тщательный анализ данных, приведенных в таблицах Т. Рикитаке, с привлечением некоторых других сведений, не использовавшихся этим исследователем, позволяет дополнительно отметить некоторые тенденции особенностей наблюдавшихся биопредвестников землетрясений.

Видимо, имеются две группы млекопитающих: 1) воспринимающие изменения геофизических полей перед приближающимся землетрясением аналогично птицам; 2) воспринимающие эти изменения раньше, чем птицы. Для млекопитающих из восьми случаев возникновения биопредвестников в области больше трех дней характерно аномальное поведение крыс. Максимальное зарегистрированное время появления биопредвестников для птиц составляет 10 дней, для млекопитающих — 1—1,5 месяца.

Выявлена зависимость магнитуды землетрясения от времени появления предвестников для птиц и млекопитающих. При наблюдениях за млекопитающими и птицами намечается разделение биопредвестников на

краткосрочные (группа I), время опережения от минут до 6 ч, и среднесрочные (группа II), время опережения от 3 ч до 1,5 месяцев.

В группу I входят млекопитающие: 81 % — собаки, рогатый скот, лошади; 19 % — остальные животные.

В группу II входят собаки, рогатый скот, лошади, которые составляют 9 %, 91 % — остальные животные, в числе которых преобладают дикие.

Таким образом, лошади, рогатый скот, собаки, как правило, «предчувствуют» землетрясение не более чем за 6 ч. Дикие и часть домашних животных (кошки, свиньи) предчувствуют землетрясения в среднем за более длительный срок — от 3 ч до 1,5 месяцев. Аналогичная тенденция наблюдается и для биопредвестников, связанных с птицами. В группе краткосрочных предвестников для птиц 45 % — домашние птицы (куры, утки и т. д.), 55 % — дикие. В группе среднесрочных предвестников домашние птицы составляют 19 %, дикие — 81 %.

Аномальное поведение животных может обнаруживаться на расстояниях в десятки, сотни километров от будущего эпицентра и захватывать площади, значительно превышающие проекцию очага на дневную поверхность. Время упреждения биопредвестниками землетрясений может варьировать от нескольких месяцев до минут и секунд. По длительности опережения можно выделить несколько групп биопредвестников. Чем больше магнитуа готовящегося события, тем больше время опережения биопредвестников.

Первая попытка организации систематических исследований биопредвестников землетрясений в СССР была предпринята профессором Казахского университета П. И. Мариновским (1984), организовавшим в предгорьях г. Алма-Аты постоянные стационарные наблюдения за аномальным поведением животных при повышенной сейсмической активности. В результате проведенных

исследований установлено, что практически все виды животных Казахстана реагируют на изменения сейсмической ситуации, находясь в естественной среде обитания.

В то же время существует пороговый уровень в реакциях биосистем, при котором поведение животных при сильных землетрясениях отличается от поведения при повышенном фоне сейсмической активности. Но землетрясение — событие редкое, поэтому статистическое накопление данных об аномальном поведении животных перед событиями такого рода происходит медленно.

Землетрясение — довольно часто повторяющееся явление в эволюции экосистем. Экосистемы, сформировавшиеся в сейсмоопасных районах, адаптированы к катастрофам, происходящим на поверхности Земли в течение эволюции, и приобрели механизмы сигнального восприятия необходимой информации. В то же время «цена адаптации», т. е. разрушение экосистем и гибель части популяции, по всей вероятности, несущественно сказывается при восстановлении сформировавшихся экосистем сейсмоопасных районов. Восприятие сигнальной информации теоретически может происходить на любом уровне биоценоза. Усиление и распространение сигнальной информации биопредвестников происходит за счет увеличения дисперсии одного или нескольких звеньев экосистемы по принципу распространяющейся цепной реакции на весь биоценоз, приводящей к развитию аритмических процессов, изменению формы колебательных процессов в экосистемах, т. е. к развитию десинхронизирующих процессов в наиболее неустойчивых звеньях экосистем.

Следовательно, биосистемы как бы отрабатывают алгоритмы предстоящей аварийной ситуации: виды, выживающие за счет производства большого количества

потомков, увеличивают плодовитость; виды, воспитывающие свою молодежь, снижают количество потомков и производят их более крупными. Происходит несезонное или повторное цветение некоторых растений, мигрирующие популяции меняют маршруты, сдвигаются сроки гнездования птиц и т. д.

При исследовании на Камчатке нами выделены вероятностные группы указателей — предвестников землетрясений.

К ним относились птицы, миграции горбуши и кеты к местам нерестилищ, аномалии в круговых сетях пауков-крестовиков. Комплексные прогнозы на 90 % совпадали с последующей сейсмической активностью, что позволяет считать биоиндикацию землетрясений перспективным направлением исследований по проблеме среднесрочных и краткосрочных прогнозов земных катастроф.

4.2. Биопрогнозирование антропогенных кризисных ситуаций

Антропогенные катаклизмы в своем проявлении аналогичны природным, их предварительные стадии характеризуются общими закономерностями. В то же время существует ряд особенностей в развитии антропогенных экологических кризисов. Начальные этапы кризиса протекают относительно медленно и незаметно. Дестабилизирующие влияния охватывают не все трофические уровни и взаимоотношения в экосистеме.

Наиболее неустойчивы консументы верхнего трофического уровня, узкоспециализированные виды и

крупные животные. После достижения критического уровня развивается лавинообразный процесс деградации биоценозов с сопутствующей миграцией или гибелью коренных популяций видов. Происходит замещение вымерших видов другими массовыми видами, способными существовать в разрушенной среде обитания. По аналогичному механизму протекали экологические катастрофы Аральского моря, озера Балхаш и др.

По мнению Н. Ф. Реймерса (1994), в качестве количественной меры нарушения стационарного равновесия экосистемы при техногенных воздействиях может быть использовано «правило 10 %». При накоплении токсических ингредиентов или разрушений биоценоза больше 10 % начинается деградация и саморазрушение экосистем. Необходимо отметить, что данная закономерность характерна для хронических, постоянно действующих антропогенных влияний и существенно зависит от типа биоценозов.

Хорошим и надежным биоиндикатором нарушения стационарного состояния экосистем является массовое размножение популяций какого-либо вида, превышающих по численности свои многолетние циклические колебания. Исследование особенности биологии таких видов позволяет определить антропогенную причину освобождения или расширения экологической ниши и прогнозировать возможные последствия наблюдаемой нестабильности биоценоза. В современной урбанизированной природной среде в экосистемах, находящихся на разных стадиях восстановительной сукцессии, проведение подобного рода исследований осложняется неоднозначной интерпретацией полученных результатов.

Сохранение коренных биоценозов в пределах заповедных территорий, заказников, резерваций и национальных парков в качестве эталона природных сообществ необходимо при прогнозировании близких и

отдаленных последствий антропогенного влияния на природные экосистемы.

Высокие концентрации токсичных веществ в воде, изменение рН, минерализация, мутность, повышение концентрации биогенных элементов и другие нарушения приводят к изменению биологических показателей. Хронические эффекты проявляются на уровне организма в виде молекулярных, генетических, клеточных, патологических изменений.

Компенсаторные реакции развиваются в направлении усиления процессов катаболизма, перераспределения энергетического бюджета на поддержание метаболизма в ущерб пластическому росту и созреванию, активации детоксикационного механизма с повышением энергетических затрат на выживание в неблагоприятных условиях среды.

Появляются признаки нарушения гомеостаза: мутации, новообразования, изменения клеточной структуры органов и тканей, показателей крови, патологические перерождения органов.

Наблюдаются признаки нарушения гомеостаза: увеличение содержания катехоламинов, аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ), кортикостероидов, белков типа металлотиионов, высокая активность энзимов, повышение потребления кислорода, тахикардия, усиленная вентиляция жабр, сгущение крови, высокое содержание молодых незрелых форм клеток и лейкоцитов: моноцитов, нейтрофилов, эозинофилов и др.

На уровне популяций хронические негативные факторы приводят к повышенной элиминация особей, сокращению продолжительности жизни, снижению скорости роста и нарушению сроков созревания гонад или репродуктивной несостоятельности. Адаптивные реакции направлены на выживание рано созревающих мелкоразмерных особей в популяции — *r*-стратегов, обеспечивающих поддержание

численности и популяционной плодовитости, селекцию толерантности.

Поведенческие реакции характеризуются снижением эффективности поиска и утилизации ресурсов, избегания хищников или поиска жертв, нарушением миграционного и нерестового процесса и др.

Признаки угнетения: сокращение пополнения, высокий процент гибели, нарушения в соотношении возрастных когорт и полов, увеличение количества незрелых особей, сокращение размерной и возрастной структуры.

Признаки перестройки: увеличение доли созревающих особей в раннем возрасте, преобладание мелкоразмерных особей младших возрастных групп.

На уровне сообществ происходили следующие нарушения:

- энергетические — ускорение дыхания сообществ и разбалансирование соотношения продукции к дыханию, увеличение значимости энергии, поступающей извне;
- трофические — ускорение оборота элементов питания, сокращение их цикла в экосистеме, потери биогенных элементов;
- продукционные — усиление синтеза и экспорта первичной продукции, более высокое потребление энергии на поддержание биомассы экосистемы;
- структурные — снижение видового разнообразия и упрощение сообществ, укорочение пищевых цепей, увеличение видовой доминантности, увеличение роли мелких форм (*r*-стратегов) в сообществах, обеспечивающих более быстрый оборот биомассы.

К хроническим эффектам на уровне сообществ относятся:

- изменения в соотношениях продукции (P) к тратам на дыхание: (R) – $P / R > 1$ или $P / R < 1$;
- высокое соотношение минеральных форм фосфора и азота к их общему содержанию, повышенный их сток;
- высокое соотношение биомассы первичной продукции и суммарной, высокое соотношение продукции и биомассы или дыхания и биомассы;
- низкие показатели индекса биоразнообразия, изменения рангового распределения, изменения в соотношении мирных и хищных форм, высокий процент доминирования эврибионтных видов, снижение условной индивидуальной массы организма в сообществе и др.

Необходимо отметить, что при расчете вероятности риска антропогенных катастроф существует, как минимум, две шкалы: медико-социальная и экологическая.

В медико-социальной шкале выделяются четыре градации¹:

1) благополучная ситуация, которая характеризуется устойчивым ростом продолжительности жизни, повышением рождаемости, снижением заболеваемости;

2) напряженная экологическая ситуация — заболеваемость населения по возрастным группам достоверно выше нормы по сравнению с аналогичными районами проживания. Средняя продолжительность жизни статистически достоверно не снижается, не наблюдается более ранняя инвалидность людей;

3) экологическое бедствие — невозможно традиционное социально-экономическое хозяйствование. Статистически достоверно повышены детская смертность, заболеваемость детей и взрослых, частота психологических нарушений, частота и скорость наступления инвалидности.

¹ Раймерс Н. Ф. Экологии (теория, законы, правила, принципы и гипотезы). М: Россия молодая, 1994.

Продолжительность жизни и рождаемость статистически ниже, чем в аналогичных районах;

4) экологическая катастрофа — территория непригодна для постоянного проживания. Экологические условия смертельно опасны.

По экологической шкале можно выделить шесть градаций:

1) естественное состояние — характеризуется незначительными антропогенными воздействиями, максимальной для данного типа экосистем биомассой и минимальной биологической продуктивностью;

2) равновесное состояние — интенсивность восстановительных процессов экосистем выше интенсивности антропогенных нарушений или равна ей, биологическая продуктивность выше зрелых сообществ, наблюдается снижение общей биомассы;

3) кризисное состояние — антропогенные нарушения по интенсивности превышают восстановительные процессы экосистем. В то же время еще сохраняется естественный тип экосистем, биомасса снижена, значительно повышена биологическая продуктивность;

4) критическое состояние — наблюдается обратная смена ранее существующих экосистем на менее продуктивные экосистемы, частичное опустынивание, биомасса невелика и снижается;

5) катастрофическое состояние — процесс смены и закрепления малопродуктивных экосистем, сильное опустынивание, биомасса и биологическая продуктивность минимальны;

6) состояние коллапса — необратимая потеря биологической продуктивности, биомасса стремится к нулю.

Используя экологическую и медико-биологическую шкалу, можно ранжировать наблюдаемые при мониторинге

изменения, рассчитывать вероятность риска деградации окружающей среды и здоровья людей.

Выявляются виды-указатели, индикаторы степени антропогенных загрязнений с последующим определением критических нагрузок в лабораторных условиях. Определяются виды-индикаторы восстановительных процессов. Уточняется временная последовательность при использовании биотестов и площадь элементарной анализируемой пространственной ячейки. Намечается пространственное размещение биотестов с учетом размерности каждого и площади элементарной пространственной ячейки с целью компактного заполнения информацией всей последовательности анализируемого пространства. Производится разделение мониторингового района по выбранной системе элементарных пространственных ячеек и заполнение их информацией биотестов. Для токсикантов, способных накапливаться в трофических цепях биоценозов (радионуклиды, тяжелые металлы), определяются коэффициенты накопления в каждом трофическом уровне в зависимости от типа биоценоза.

Оцениваются коэффициенты миграции токсикантов при биологическом переносе веществ основными группами животных. Определяются коэффициенты биотрансформации загрязняющих веществ, обуславливающей повышение их токсичности в результате биохимических реакций при миграции в трофических цепях «ртуть — метилртуть».

Проводится статистическая обработка пространственновременной структуры биотестов с целью текущей оценки ситуации. На основании полученной информации разрабатываются прогностические модели последующего развития экологической ситуации.

В лабораторных и полевых исследованиях выясняются зависимости «доза — биологическая реакция» для

загрязнений при их комплексном воздействии, характерном для данной местности: тяжелые металлы, бифенолы, электромагнитные поля, радиация.

Экспериментальные исследования проводятся дифференцированно для биосистем различного уровня организации: микроорганизмов, растений, беспозвоночных, рыб, амфибий, пресмыкающихся, птиц, млекопитающих и человека. В качестве объектов исследований используются потенциальные виды-индикаторы.

Первая группа тестов на чувствительность биообъектов к влиянию техногенных факторов выполняется на рефлекторном или поведенческом уровне. Среди беспозвоночных для этого используются пауки кругопряды, дождевые черви, которых можно вместе с почвой помещать между двумя стеклами, где они живут и перемещаются по своим ходам. При добавлении расчетной концентрации загрязняющих почву веществ наблюдаются изменения их двигательной реакции. Хорошим объектом являются аквариумные, речные рыбы и моллюски. Для млекопитающих разработано большое количество поведенческих лабораторных методик, позволяющих наблюдать за изменениями в их поведении при действии загрязняющих факторов.

Вторая, наиболее чувствительная, группа — эмбриональные тесты, с помощью которых можно оценить степень влияния токсикантов на эмбриональное развитие — самый чувствительный период индивидуального развития организма. Для растений это всхожесть семян, для беспозвоночных — эмбриональные и личиночные стадии онтогенеза. У рыб и амфибий исследуется влияние радиации на развитие икры, у рептилий и птиц — развитие яиц, у млекопитающих — период беременности. При этом учитывается количество появившихся потомков по отношению к числу зародышей, типы аномалий развития и

число особей, доживших до половозрелого возраста, пол, вес и размеры.

В связи с тем, что техногенные факторы в последние 40 лет приобрели хронический характер, необходимо проводить специальные исследования по хроническому влиянию загрязнителей в течение 70—80 % периода онтогенеза живых биосистем. При хроническом влиянии факторов возможно получение достаточно полной информации с учетом критических периодов постнатального онтогенеза, в которых устойчивость организма снижается в несколько раз. В качестве тест-реакций необходимо использовать основные биохимические и физиологические показатели, специфичные для каждой группы биосистем.

Последующий этап включает в себя изучение негативного влияния антропогенных факторов в ряду поколений животных. При хроническом действии факторов потомства скрещиваются в течение 10—20 поколений. Отмечают отход животных в разных возрастных группах, уродства, типы патологий и проводят генетический контроль в соматических и половых клетках животных. Как показали исследования по влиянию слабых доз радиации, наиболее выраженные отрицательные последствия в популяции лабораторных мышей наблюдались в первом, третьем, седьмом и 12-м поколениях животных.

Наряду с лабораторными исследованиями используются опыты в естественных условиях. Индикаторные биообъекты помещают в загрязненные природные условия с известными количественными характеристиками воздействующих факторов и с определенной периодичностью фиксируют комплекс реакций, который сравнивается с показателями контрольной группы.

После анализа всей совокупности экспериментальных данных и наблюдений в природе выбирается группа

биоиндикаторов, которая рекомендуется для использования в системе того или иного типа мониторинга.

Таким образом, научно обоснованный экологический мониторинг позволяет проследить степень антропогенного влияния на природную среду. Динамические ряды наблюдения по апробированной системе биотестов позволяют прогнозировать состояние исследуемых экосистем, разрабатывать оптимальные природоохранные мероприятия и обосновывать необходимые экологические санкции. В регионах с повышенной вероятностью экологических катастроф природного и антропогенного характера экологический мониторинг окажет неоценимую помощь при прогнозировании стихийных бедствий.

Основой комплекса специфических реакций биомониторинга являются биотесты, проградуированные в экспериментальных условиях к доминирующим антропогенным факторам.

К основным реакциям биосистем при физико-химических антропогенных воздействиях на экосистемы относятся:

- качественное и количественное изменение химического состава воздуха, воды и почвы (глобальное);
- нарушение температурного режима среды (глобальное);
- изменение электромагнитного состояния среды (глобальное);
- изменение природной освещенности (глобальное);
- нарушение водного режима среды;
- изменение уровня ионизирующей радиации;
- нарушение физических и механических показателей почвы;

- изменение показателей звуковых колебаний среды;
- изменение химического состава продуктов питания.

Основные реакции биосистем на организменном уровне:

- изменение химического состава организма и накопление ксенобиотиков;
- изменение репродуктивного потенциала особей;
- изменение морфофизиологических показателей особей в результате нарушения процессов развития;
- изменение длительности стадий онтогенеза и продолжительности жизни;
- нарушения поведения.

Реакции на уровне популяций заключаются в изменении:

- генетической структуры популяций;
- пространственной структуры популяций;
- возрастной структуры;
- соотношения полов;
- численности популяций.

Биоценотические реакции — рассогласование сроков развития различных видов в сообществе; нарушение трофических взаимодействий в связи с изменением структуры сообществ.

С целью создания системы снижения последствий экологических кризисов необходима организация биоиндикационного контроля в районах потенциально опасных промышленных объектов. К их числу принадлежат атомные станции, радиохимические заводы по переработке, обогащению и дезактивации радиоактивных материалов и другие промышленные предприятия.

Контрольные вопросы

1. Как происходит прогнозирование землетрясений?
2. Какие известны биоиндикаторы землетрясений?
3. Как происходит биопрогнозирование сейсмической активности?
4. Каковы особенности техногенных катаклизмов?
5. Что собой представляет экологическая шкала антропогенных нарушения?
6. Какие существуют методы биоиндикации техногенных катаклизмов?

Заключение

Исследования по биоиндикации антропогенных загрязнений и экологических катастроф являются необходимым компонентом современного экологического мониторинга. Практически по любому виду загрязнений имеются биотесты, позволяющие оценить степень трансформации экосистем. Большое количество работ посвящено нефтезагрязнениям почв и водных биоценозов. Водоемы способны накапливать, адсорбировать антропогенные загрязнения и служить долговременным источником токсического действия на окружающую среду. Особенно опасны нефтезагрязнения для непроточных водоемов, так как они приводят к длительному загрязнению и деградации биоценозов. Необходимо расширить исследования по биоиндикации распространенных нефтепродуктов, таких как бензин, дизельное топливо, бытовые и строительные пластмассы.

В концепции биоиндикационного мониторинга можно выделить основные системы тестов, позволяющие судить о деградации сообществ и процессах их восстановления. Первая группа тестов представлена видами-указателями, дифференцированно чувствительными к различным типам антропогенных загрязнений, активно реагирующими снижением численности и видового разнообразия или временным значительным повышением численности в зависимости от особенностей действующих факторов. Динамика видового разнообразия сообществ-указателей позволяет качественно оценить степень влияния загрязнений на экосистему.

Вторая группа тестов — виды, которые устойчивы к загрязнению, при сокращении видового разнообразия сообщества сохраняют относительно высокий уровень численности и позволяют оценить степень деградации биоценозов.

К третьей группе биоиндикаторов относятся виды-восстановители, повышение количества видов и численности которых характеризует восстановительные процессы и отражает интенсивность процессов сукцессии экосистем. Видовое разнообразие и численность сообществ - восстановителей позволяет прогнозировать скорость восстановления биоценозов после антропогенных загрязнений и экологических катаклизмов. Недостаточно глубокая современная разработка концепции биоиндикации экологических катастроф затрудняет прогнозирование природных катаклизмов и землетрясений. Необходимо подчеркнуть, что временной прогноз землетрясений в связи с недостаточной изученностью биопредвестников является самым слабым звеном исследований. Существующий уровень исследований позволяет с определенной вероятностью утверждать, что землетрясение готовится. Когда оно произойдет и насколько разрушительным окажется, предсказать трудно.

Прогнозирование техногенных экологических катастроф осуществляется при изучении уже случившихся антропогенных катаклизмов: разливов нефти, загрязнения бытовыми отходами и т. д. Последствия новых техногенных аварий прогнозируются неэффективно. Предложенная в середине XIX в. теория катастроф Ж. Л. Кювье не получила системного развития. Современные исследования по биопрогнозированию естественных и антропогенных катастроф находятся на этапе сбора фактического материала и построения гипотез.

Тем не менее биотестирование и биопрогнозирование антропогенных загрязнений является активно развивающейся областью экологических исследований, позволяющих адекватно прогнозировать, оценивать разрушение природной среды и разрабатывать оптимальные рекультивационные мероприятия.

Библиографический список

1. *Воробьев, Д. С.* Биологические основы очистки донных отложений водных объектов от нефти и нефтепродуктов : диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук / Д. С. Воробьев. — Томск, 2013.

2. *Зелялетдинова, Н. А.* Влияние экологических факторов на сообщества почвенных инфузорий / Н. А. Зелялетдинова, А. Г. Карташев. — Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016.

3. *Карташев, А. Г.* Биоиндикационные методы контроля окружающей среды : учебное пособие для вузов / А. Г. Карташев. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 138 с.

4. *Карташев, А. Г.* Адаптация животных к хроническим факторам / А. Г. Карташев. — Lap Lambert Academic Publishing, 2014.

5. *Карташев, А. Г.* Биоиндикация антропогенных загрязнений / А. Г. Карташев. — Томск : Изд-во Томск. Гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2019.

6. *Карташев, А. Г.* Биоиндикация экологического состояния окружающей среды / А. Г. Карташев. — Томск: Водолей, 1999.

7. *Карташев, А. Г.* Биосфера и человек / А. Г. Карташев. — Томск: Изд-во Томск. Гос. ун-та, 2003.

8. *Карташев, А. Г.* Влияние нефтезагрязнений и сеноманских растворов на сообщества почвенных нематод / А. Г. Карташев, С. А. Калашникова. — М: Горячая линия — Телеком, 2018.

9. *Карташев, А. Г.* Влияние нефти, нефтепродуктов и сеноманских растворов на сообщества раковинных амеб / А. Г. Карташев, Т. В. Денисова, Е. В. Кулюкина. — Томск: Изд-во Томск. Гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020.

10. *Карташев, А. Г.* Основы электромагнитной экологии / А. Г. Карташев, М. А. Большаков. — Томск: Изд-во Томск. Гос. ун-та, 2005.

11. *Карташев, А. Г.* Структура ловчих сетей пауков кругопрядов / А. Г. Карташев, А. А. Карташева. — Томск: Изд-во Томск. Гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2009.

12. *Карташев, А. Г.* Экологические аспекты нефтедобывающей отрасли Западной Сибири / А. Г. Карташев. — Томск: Изд-во Томск. Гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2007.

13. *Михайлова, Л. В.* Разработка и апробация норматива содержания нефти в донных отложениях поверхностных водных объектов / Л. В. Михайлова, Е. А. Исаченко-Боме // Водные ресурсы. — 2012. — Т. 39, № 5. — С. 530—542.

14. *Раймерс, Н. Ф.* Экологии (теория, законы, правила, принципы и гипотезы) / Н. Ф. Раймерс. — Москва : Россия молодая, 1994.

