

Выводы

Выполненные исследования подтверждают, что функционирование объекта по уничтожению химического оружия в п. Горный не привело к существенно-му росту техногенной нагрузки на окружающую среду и рисков для здоровья населения по сравнению с фоновыми для данной территории показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Временная инструкция о порядке проведения оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) при разработке технико-экономических обоснований (расчетов) и проектов строительства народнохозяйственных объектов и комплексов. М., 1990, 100 с.
2. Пособие по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) при разработке технико-экономических обоснований (расчетов) инвестиций и проектов строительства народнохозяйственных объектов и комплексов. М., 1992, 77 с.
3. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86). Л.: Гидрометеиздат, 1987, 93 с.
4. Оценка риска для здоровья. Опыт применения методологии оценки риска в России (Самарская область). М.: Консультативный центр по оценке риска, 1999, 209 с.
5. *Онищенко Г.Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А.* Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002, 408 с.
6. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004, 143 с.
7. *Глухан Е.Н., Чернышова М.П., Горский В.Г. и др.* Безопасность жизнедеятельности, 2006, № 3, с. 2—7.
8. *Глухан Е.Н., Чернышова М.П., Горский В.Г. и др.* Хим. пром., 2006, т. 83, № 1, с. 43—53.
9. *Fenner K., Sheringer M., Hungerbluhler K.* Environ. Sci. and Technol., 2000, v. 34, p. 3809—3817.
10. *Глухан Е.Н., Чернышова М.П., Горский В.Г. и др.* Хим. пром., 2006, т. 83, № 4, с. 196—205.
11. US EPA. Guidelines for Ecological Risk Assessment. Washington: EPA, 1996, EPA-630-R-98-002F, 41 p.
12. *Jolliet O., Margni M., Charles R.* Int. J. of LCA, 2003, v. 8, № 6, p. 324—330.
13. *Глухан Е.Н., Чернышова М.П., Горский В.Г. и др.* Тр. 16 междунар. конф. «Математические методы в технике и технологиях», т. 4, Ростов-на-Дону: РГАСХМ, 2003, с. 20.
14. *Mackay D.* Multimedia environmental models, the fugacity approach. Chelsea: Lewis Publishers, 2001, 1 CD.
15. CalTOX™. Los Angeles: University of California, 1994—2003, 1 CD.
16. *Глухан Е.Н.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 200612803, РФ, 2006 г.
17. *Глухан Е.Н.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 200613042, РФ, 2006 г.
18. Официальный сайт ФГУ «Государственный НИИ промышленной экологии (ГосНИИЭНП). <http://www.sar-ecoinst.org/note.htm>.
19. *Шляхтин Г.В., Холстов В.И., Чернова Р.К. и др.* Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 1995, т. XXXIX, № 4, с. 111—113.
20. Объект 1202. Медико-экологическая безопасность: ретроспектива, анализ, прогноз (по результатам экологического аудита объекта 1202 УХО). Саратов: СВИ РХБЗ, 2005, 48 с.

УДК 623.459.8.006.014+631.427

Биоиндикация и биотестирование природных сред как основа экологического контроля на территории зоны защитных мероприятий объекта по уничтожению химического оружия

Т. Я. Ашихмина, Л. И. Домрачева, Л. В. Кондакова, С. Ю. Огородникова,
Т. И. Кочурова, Г.Я. Кантор

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Вятский государственный гуманитарный университет, Региональный центр государственного экологического контроля и мониторинга объекта хранения и уничтожения химического оружия по Кировской области

В программу экологического контроля и мониторинга в районах расположения объектов по уничтожению химического оружия включены подлежащие определению показатели отклика биоты на техногенное воздействие, вероятность которого не исключается при функционировании этих чрезвычайно опасных химических производств. Существующие биотест-объекты, применяемые для оценки токсичности природных и сточных вод, водных вытяжек из почвы, осадков, отходов производства, отражают токсичность среды по содержанию в ней в основном тяжелых ме-

таллов и нефтепродуктов и не могут быть использованы для определения зараженности природной среды отравляющими веществами и продуктами их деструкции. Для экологического контроля и мониторинга состояния природной среды в районе расположения объекта по уничтожению химического оружия требуется разработка специфических методов биоиндикации и биотестирования, позволяющих с помощью биотестов оценивать токсичность среды по содержанию в ней фтор-, сера-, хлор-, фосфорорганических соединений.

В настоящее время организованы специализированные лаборатории биоиндикации и биотестирования во всех регионах в составе региональных центров государственного экологического контроля и мониторинга объекта хранения и уничтожения химического оружия. Базовым научно-методическим центром по организации биологического мониторинга определен Региональный центр государственного экологического контроля и мониторинга объекта хранения и уничтожения химического оружия по Кировской области.

В рамках поставленной экологической проблемы в Институте биологии Коми НЦ УрО РАН и Вятского государственного гуманитарного университета в течение ряда лет ведутся исследования, направленные на создание новых специфических методов биологического мониторинга и на выявление наиболее информативных биоиндикаторов лесных, луговых и водных экосистем, а также почвенной флоры и фауны [1–4]. В лабораторных условиях проводится отработка методик биотестирования природных сред и атмосферного воздуха на техногенное загрязнение.

Оценка токсичности почв

Для выявления зараженности почв весьма эффективен комплексный альго-микологический (водорослево-грибной) анализ почв [5]. Микроскопические водоросли и грибы — постоянные обитатели любого типа почв. Отклонения от нормального функционирования микроскопических водорослей и грибов в загрязненных почвах проявляются в снижении видового разнообразия водорослей, преобладании численности грибной биомассы над водорослевой, нарастании доли грибов с темно-окрашенным мицелием, появлении фитопатогенных комплексов, вызывающих угнетение роста и развития высших растений. Все эти признаки указывают на снижение биологической активности почвы и развитие ее токсикоза. Признаки токсикоза почвы носят универсальный характер независимо от природы загрязняющего вещества. Таким образом, появляется возможность устанавливать экспрессным методом токсичность почвы. Если окажется, что почвы токсичны, делается их полный химический анализ.

В качестве экспрессного метода оценки токсичности почвы может быть использован также биотест на жизнеспособность семян высших растений, произрастающих на контролируемой почве. Жизнеспособность семян оценивают по окрашиванию их раствором красителя хлористого тетразолия. Этот метод был опробован нами на примере злаковых (пшеница), крестоцветных (горчица) в почвенной вытяжке, а также на почвенных образцах, обработанных модельным токсиантом [4, 5].

Использование методов альгоиндикации позволило выявить группу водорослей, наиболее чувствительных к загрязнению почвы. Это представители отдела желтозеленых (Xanthophyta): *Pleurochloris magna*, *P. pyrenoidesa*, *Botrydiopsis eriensis*, *Polyedriella helvetice*, *Ellipsoidion oocystoides*, *Monodus chodatii*. Изучен отклик почвенной микрофлоры на техногенное загрязнение почв в Оричевском районе Кировской области, где находится арсенал химического оружия. На ряде контрольных участков было установлено некоторое превышение ПДК по мышьяку. Накопление мышьяка в почве вызывает резкие изменения в структуре, видовом составе и количественных характеристиках фото-

трофных микробных сообществ. Одноклеточные зеленые водоросли являются наиболее стабильным компонентом фототрофных микробных сообществ на всех стадиях развития почвенных микробценозов и при любых концентрациях мышьяка. В почве, где отмечена максимальная концентрация мышьяка, наблюдается развитие микрофлоры.

Применяемый в почвенной микробиологии метод стеклообрастания, который первоначально предназначался для определения качественного и количественного состава микробиоты, может быть использован для биотестирования структурных изменений микробценозов при химическом загрязнении почвы [4]. Этот метод прост в исполнении, экспрессен, не требует химических реактивов, необходимо лишь простое увлажнение почвы. Данный метод показал высокую чувствительность фототрофных микроорганизмов к загрязнению почвы мышьяком. В почве с повышенной концентрацией мышьяка размножаются безгетероцистные (неспособные к азотфиксации) цианобактерии, которые образуют комплексы с мицелием грибов, формируя лишайниковую псевдоткань. Способность данного вида цианобактерий выживать и размножаться в почве, содержащей повышенные количества соединений мышьяка, делает их перспективными для разработки биопрепаратов, предназначенных для биоремедиации (биовосстановления) загрязненных почв.

Для оценки экологического состояния почв и снеговой воды в качестве тест-объектов можно использовать злаки (ячмень и пшеница). Считается, что подавление роста и развития злаков на 30% и более свидетельствует о фитотоксичности среды. Эти культуры можно рассматривать как перспективные биоиндикаторы для разработки несложных и быстрых методик биотестирования. Еще более прост и доступен в исполнении метод биотестов с использованием злаков для анализа снеговой воды. Семена раскладывают на влажную фильтровальную бумагу, которую скручивают в виде рулона и помещают в тестируемый раствор (рулонный метод). Отзывчивость такой культуры, как пшеница, подтверждена в опытах с тестированием снеговой воды.

Микроvegetационными экспериментами [6] установлено, что обработка семян сельскохозяйственных растений препаратами цианобактерий (род носток) повышает до двух раз выживаемость растений в химически загрязненных почвах.

Изучение ферментативной активности почв позволило выявить, что под влиянием фосфорорганических веществ, в частности метилфосфоновой кислоты, резко меняется активность каталазы [7]. Метод, основанный на экспресс-определении активности каталазы, можно использовать и в полевых условиях. Выявлены организмы, являющиеся конечным звеном в трансформации метилфосфоновой кислоты в почве. К ним относятся цианобактерии, которые нуждаются в фосфоре для своего питания. Данные организмы поглощают метилфосфоновую кислоту и переводят ее в другие формы.

Оценка состояния атмосферного воздуха

Биоиндикатором для оценки состояния атмосферного воздуха является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) [1–3]. Она относится к видам, чутко реа-

гирующим на техногенное загрязнение среды обитания. Этот фитоиндикатор широко распространен, произрастает как на сухих песках, так и в условиях избыточной влажности. Надо сказать, что реакции *Pinus sylvestris* L. на наличие загрязняющих веществ в воздухе, а также в почве неспецифичны и отражают общий уровень загрязнения среды веществами различной природы. Для оценки химической нагрузки на фитоиндикатор используют разные признаки: годовой прирост основного побега, длину листовую пластинки, размеры генеративных органов [8, 9].

На уровень загрязнения атмосферы указывает состояние хвои: изменение окраски (хлороз, пожелтение), преждевременное увядание хвои и дефолиация, время жизни, наличие некротических пятен [10]. Форма и цвет некротического пятна являются специфическими откликами на определенный вид загрязнения, а доля пораженной поверхности хвоинки может служить количественной оценкой реакции фитоиндикатора. Для индикационных целей могут быть использованы также морфологические [11] и анатомические характеристики хвои сосны.

Хвоя сосны обладает способностью эффективно аккумулировать загрязняющие вещества [12, 13], в частности соединения металлов в виде аэрозолей за счет диффузионного осаждения последних в полостях и воздушных каналах листовой пластинки [14]. Соединения металлов могут поглощаться также корневой системой из почвы. Поглощение может быть как метаболическим, так и пассивным [15]. Ввиду малой поверхности листа, утолщенной кожицы и малого количества устьиц вынос поглощенных микроэлементов с поверхности листовой пластинки сосны при испарении влаги и газообмене с атмосферой очень мал. За время жизни хвои (4–6 лет в зависимости от условий произрастания дерева) в ее массе накапливаются характерные для данной местности микроэлементы в количествах, достаточных для аналитического определения.

Как указано выше, для индикации уровня химического загрязнения территории важными характеристиками *Pinus sylvestris* L. являются прирост центрального побега и размеры генеративных органов. Методика, основанная на регистрации этих характеристик, отрабатывается нами на территории зоны защитных мероприятий комплекса объектов по хранению и уничтожению химического оружия в течение трех последних лет.

От состояния чистоты атмосферного воздуха зависит видовой состав и обилие лишайников на стволах деревьев. Лишайники относятся к организмам, чутко реагирующим на стрессовое воздействие. Повышенная реакция лишайников на загрязнение воздуха положена в основу методики лишайноиндикации по обилию, проективному покрытию, видовому составу этих растительных организмов [3].

Для оценки чистоты воздуха разработана также методика, основанная на определении активности пероксидазы в лишайниках. Установлено, что активность пероксидазы значительно повышается в случае техногенного воздействия и во влажном климате. Лишайник можно рассматривать как накопительный индикатор техногенного воздействия. Он действует как губка. Загрязняющие вещества собираются в слоевище лишайника, и при попадании влаги он чутко реагирует путем изменения активности фермента.

Еще в одном экспрессном методе оценки экологического состояния атмосферного воздуха в качестве биоиндикатора может служить пыльца ряда древесных растений, таких как сосна обыкновенная, лиственница сибирская, береза бородавчатая, яблоня домашняя, рябина, сирень обыкновенная, липа [2, 3]. Индикация по пыльце древесных растений отражает экологическое благополучие исследуемой территории и позволяет выявить динамику его изменения.

В качестве своеобразного индикатора чистоты атмосферного воздуха в экологическом мониторинге может быть использован снег, поскольку снеговой покров является накопителем большинства загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух [2, 3]. Данные экологического мониторинга атмосферного воздуха по снеговому покрову позволяют выявлять с учетом направления ветра зоны максимального распространения загрязняющих веществ. На основе моделей рассеивания загрязняющих веществ в снеговом покрове, построенных по комплексу показателей, можно прогнозировать зоны загрязнения при штатной работе объекта.

Важнейшей задачей экологического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха с использованием снега как индикатора является отработка методов определения в пробах снега (в органической части сухого остатка талой воды) специфических загрязняющих веществ (фосфор-, сера-, хлор-, мышьяк-, фторорганических соединений).

Оценку токсичности атмосферного воздуха можно проводить с помощью микроскопических водорослей. Для отбора пробы воздух пропускается через специальные поглотители с дистиллированной водой. Тест-объект — *Chlorella vulgaris* Beijer, *Synechocystis aquatilis* Sauv; тест-функция — изменение оптической плотности суспензии в опыте и контроле. Для оценки результатов удобно использовать шкалу токсичности [14].

В последние годы широко популярен приобретает метод анализа по флуоресцирующей асимметрии билатеральных морфологических признаков различных растительных и животных организмов как интегрального показателя экологического благополучия биоценоза. Метод рекомендуется Центром экологической политики России [8].

На основе этого подхода нами разработана методика с использованием в качестве объектов-индикаторов листьев двух растений: березы повислой (*Betula pendula*) и рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia*). Обработка данных осуществляется специальной компьютерной программой, исходными материалами для нее служат выборки коэффициента асимметрии. Результатом расчета являются таблица попарных значений оценки отношения выборочных дисперсий и таблица соответствующих величин доверительной вероятности их различия. Программа позволяет упорядочить участки мониторинга по величине выборочной дисперсии и с учетом достоверности различий сгруппировать их в кластеры, отличающиеся друг от друга на заданном уровне значимости.

Целесообразность использования растительных объектов для биомониторинга обусловлена специфической самих растений, а также биосферной ролью растительного покрова. Неподвижные растения более доступны для наблюдения, чем животные. Растения являются связующим звеном между неживыми ком-

понентами экосистем и живыми организмами, они первыми реагируют на загрязнения всех природных сред — атмосферы, почвы, воды, чем и объясняется их лучшая пригодность для раннего выявления антропогенного загрязнения.

Изучение влияния токсикантов на фотосинтетический комплекс растений показало, что под действием загрязнителей снижается содержание фотосинтетических пигментов (пожелтение листьев), это приводит к снижению продуктивности фитоценозов.

Выявлены ответные реакции на воздействие поллютантов фосфорорганической природы. Для относительно устойчивого продукта гидролиза вещества типа Vx, зарина, зомана в природных средах, каковым является метилфосфовая кислота, установлены летальные концентрации (0,1 моль/л для проростков семян) и сублетальные концентрации ($5 \cdot 10^{-3}$ моль/л для высших растений) [16].

Оценка состояния водных систем

Биоиндикаторами в экологическом мониторинге водных систем служат гидробионты. Состояние водных систем и их изменений при антропогенном воздействии можно оценить по составу сообществ водных организмов — от рыб до водорослей. Водоросли, являясь автотрофами, первыми участвуют в утилизации трофического базиса экосистемы, потребляя для образования органического вещества биогенные соединения азота и фосфора. Реакцией водорослей на изменение условий среды является изменение состава и обилия этих водных организмов, причем смена сообщества водорослей может произойти за несколько часов при смене условий среды. Именно эти характеристики — изменение численности и видового состава при изменении трофической базы водорослей — используются для биоиндикации.

Биоиндикационные методы, основанные на регистрации видового состава сообществ и обилия водорослей, дают интегральную оценку всех природных и антропогенных процессов, протекающих в водном объекте. Биоиндикация по сообществам водорослей — дешевый экспрессный метод, не связанный с дорогостоящими химическими реактивами. Но основным преимуществом метода автотрофов является то, что водоросли первыми в трофической цепи реагируют на загрязнители, не успевая их накапливать.

Испытания биоиндикационных методов (в том числе биотического индекса Вудивисса, олигохетного индекса) контроля водных экосистем с учетом региональных особенностей и материалы систематического наблюдения за состоянием водоемов на территории Кировской области [17] позволили определить перечень гидробиологических показателей, которые включены в программу экологического мониторинга.

Еще раз отметим, что для биологического мониторинга в качестве биоиндикаторов наиболее эффективны микроорганизмы благодаря возможности проводить исследования на очень большом числе особей популяции, обладающих коротким репродуктивным циклом, высокой скоростью размножения и генерации новых поколений. Так, для диагностики токсичности почвы, воды, воздуха нами разрабатываются методики с использованием тест-микроорганизмов бактерий родов *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Staphylococcus*, актиномицетов, плесневых грибов,

дрожжей, микроскопических водорослей. Подготовлена документация к аттестации методики биотестирования по тест-организму — штамм *Escherichia coli* M17 [18].

В последние годы развитие получают работы, направленные на создание генетических методов в микробиологии, которые позволяют конструировать микроорганизмы с наведенными свойствами и признаками, например с повышенной чувствительностью к определенному токсичному веществу.

В заключение отметим, что нами разработано «Научно-методическое руководство по организации подсистемы биологического мониторинга природных сред и объектов в рамках государственного экологического контроля и мониторинга объектов хранения и уничтожения химического оружия», согласованное с управлениями Росприроднадзора, Росгидромета, охраны окружающей среды и природопользования Кировской области.

Включение в программу экологического контроля и мониторинга объектов по хранению и уничтожению химического оружия методов биоиндикации и биотестирования позволяет оперативно, на ранних стадиях выявлять возможные изменения в природном комплексе на территории вблизи объектов. Ранняя биоиндикация состояния природных сред и объектов способствует принятию необходимых и своевременных мер по защите и сохранению окружающей природной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашихмина Т.Я. Комплексный экологический мониторинг объектов хранения и уничтожения химического оружия. Киров: Вятка, 2002, 544 с.
2. Ашихмина Т.Я., Алашкина Н.М., Кондакова Л.В., Тимолюк В.М., Кантор Г.Я. Вестн. Вятского государственного гуманитарного ун-та, 2004, № 10, с. 51—57.
3. Мониторинг природных сред и объектов. Под ред. Т.Я. Ашихминой. Киров: Старая Вятка, 2006, 252 с.
4. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар, 2005, 336 с.
5. Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Дабах Е.В., Кантор Г.Я., Калинин А.А., Вараксина А.И., Огородникова С.Ю. Вестн. Вятского государственного гуманитарного ун-та, 2006, № 14, с. 153—169.
6. Домрачева Л.И., Трефилова Л.В., Ветлужских И.Л. В сб.: Вопросы экологии и природопользования в аграрном секторе. М.: АНК, 2003, с. 236—240.
7. Огородникова С.Ю., Головки Т.К., Ашихмина Т.Я. В сб.: Науч. докл.: Коми научный центр УрО РАН. Сыктывкар, 2004, вып. 464, 24 с.
8. Захаров В.М. и др. Здоровье среды: методика оценки (Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методическое руководство для заповедников). М.: 2000, 28 с.
9. Селянкина К.П., Шкарлет О.Д., Мамаев С.А. В сб.: Загрязнение атмосферного воздуха предприятиями черной и цветной металлургии и меры по его защите. Челябинск, 1972.
10. Поповичев Б.Г. Лесоводство, лесные культуры и почвоведение, 1980, № 9, с. 59—62.
11. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990, 200 с.
12. Шуберт Р. В сб.: Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. Л.: ГМИ, 1982, вып. 1, с. 104—111.
13. Черненко Т.В. Пограничные проблемы экологии. Сб. науч. тр. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986, с. 116—127.
14. Фомин Б.И. и др. Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем, 1992, т. 14, с. 103.

15. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989, 439 с.
16. Огородникова С.Ю., Головки Т.К. *Агрoхимия*, 2005, № 4, с. 37–41.
17. Кочурова Т.И., Тимонюк В.М., Машковцева Л.В. В сб.: Актуальные проблемы регионального экологического мониторинга: теория, методика, практика. Мат. Всерос. науч. школы, г. Киров, 16–18 ноября 2004 г. Киров, 2004, с. 218–219.
18. Научно-методическое руководство по организации подсистемы биологического мониторинга природных сред и объектов в рамках государственного экологического контроля и мониторинга объектов хранения и уничтожения химического оружия. Под ред. Т.Я. Ашихминой. Киров.: ВятГГУ, 2006, 249 с.