

Использование живых организмов различных таксономических групп для биоиндикации состояния окружающей среды

© 2007. А.И. Иванов

РЦГЭКиМ по Пензенской области

Изложены результаты изучения возможностей использования организмов различных таксономических групп в целях биоиндикации. Подобран спектр индикаторных видов для биомониторинга в зоне защитных мероприятий объекта по уничтожению химического оружия в районе станции Леонидовка Пензенской области. Дается оценка эффективности различных методик, основанных как на морфологических, так и на физиолого-биохимических критериях.

The results of the investigation of the abilities of organisms belonging to different taxonomic groups for bioindication are set. A specter of indicator species for biomonitoring in the zone of protection activities in the chemical weapon destruction object in the vicinity of Leonidovka station in the Penza region is selected. The effectiveness of different methods based on both morphological and physiologo-biochemical criteria is evaluated.

Одним из важнейших способов оценки состояния окружающей среды является биоиндикация. В отличие от других способов она позволяет давать оценку хронического воздействия неблагоприятных факторов, в том числе и химического загрязнения. С помощью биоиндикации можно проследить последствия длительного воздействия того или иного поллютанта в ультрамалых концентрациях, находящихся далеко за пределами чувствительности приборов. Кроме того, биоиндикация позволяет оценивать суммарный эффект комплекса неблагоприятных факторов. Несмотря на это, в настоящее время существует лишь одна аттестованная методика [1]. Остальные находятся в основном в стадии разработки и используются лишь при проведении научных исследований. В связи с этим целью данной работы было изучение возможностей использования методов биоиндикации для мониторинга состояния окружающей среды в зоне защитных мероприятий (ЗЗМ) строящегося объекта уничтожения химического оружия (УХО) в окрестностях станции Леонидовка Пензенской области.

Эта статья написана на основе материалов полевых и лабораторных исследований, проводившихся под руководством автора с 1999-го по 2007 год, и позволивших четко определить круг представителей различных таксономических групп, перспективных для использования в целях биоиндикации в районе исследований.

Как показали исследования, проводившиеся на оз. Моховом, где в прошлом уничтожалось химическое оружие, очень чувстви-

тельными к химическому загрязнению являются диатомовые водоросли [2]. В частности, у *Hantzschia amphioxys* часто бывает скошена правая сторона панциря, у *Eunotia lunaris* имеются расширения створки посередине и ближе к концам. Аномальные форму и структуру панциря ранее уже отмечали многие исследователи диатомовых [3, 4] и связывали наличие уродств с химическими загрязнениями воды, поражением различными паразитами, генетическими изменениями. Находки уродливых форм диатомей в оз. Моховом, очевидно, могут быть связаны с химическим загрязнением его вод. Более того, вполне возможно, что эти отклонения у *Eunotia lunaris* являются проявлением массовой мутации генофонда популяции, так как они отмечены у 80% особей. Закрепление мутации в виде многоклеточности и уродств могло произойти при постоянном наличии в среде мутагена (отравляющих веществ), так как популяции диатомей имеют клональный характер.

Раковинные амёбы как один из доминирующих компонентов почвенной фауны активно заселяют верхние органогенные и органоминеральные горизонты почв, достигая во многих из них высокой численности, биомассы и видового разнообразия. Раковинки амёб являются своего рода посредником между организмом и средой и аккумулируют экологические воздействия на популяцию. Раковинки длительное время сохраняются в почве, а слабая двигательная активность этих организмов способствует образованию характерных видовых комплексов [5]. Это определяет высокую индикаторную значимость раковин-

ных амёб. На обследованной территории обнаружен 31 вид раковинных амёб [6]. Наиболее типичными структурообразующими видами оказались *Centropyxis aerophila* и *C. aerophila sphagnicola*. Распространены также *C. sylvatica globulosa*, *Trinema complanatum*, *T. lineare*. В составе комплекса преобладают представители четырёх семейств – *Centropyxidae*, *Cyclopyxidae*, *Euglyphidae* и *Trinematidae*. Вместе они составляют 68% всего видового разнообразия. Таким образом, определён видовой состав и выявлены удобные индикаторные виды почвенных раковинных корненожек. Опираясь на эти данные, можно строить оригинальную систему мониторинга упомянутой территории.

Сведения о грибах-индикаторах загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами и мышьяком в настоящее время весьма ограничены. Имеющиеся литературные источники посвящены в основном съедобным видам макромицетов, накапливающим наиболее токсичные элементы: свинец, ртуть и кадмий [7, 8]. Поэтому целью наших исследований был поиск видов-индикаторов загрязнения окружающей среды мышьяком и тяжёлыми металлами, в число которых вошли железо, кобальт, марганец, никель, свинец, цинк и хром. В качестве объектов исследований были взяты относящиеся к различным трофическим группам макромицеты порядков *Aphylllophorales*, *Agaricales* и *Auriculariales*.

Сбор плодовых тел грибов для исследований осуществлялся в лесных экосистемах Пензенской области в 2005–2006 гг. Всего было собрано 540 образцов, относящихся к 103 видам, по каждому виду анализировалось не менее трех образцов. Способность к биоабсорбции изучаемых элементов оценивалась в условиях различных подтипов серых лесных почв, не испытывающих техногенного воздействия. Среди них наиболее распространёнными являются светло-серые лесные маломощные супесчаные почвы и светло-серые лесные среднемощные суглинистые, сформированные на песках, глинах и опоках. Они отличаются малым содержанием гумуса, что обуславливает их низкую сорбционную способность. Кислотность колеблется от 4,8 до 5,7 единицы рН. Содержание подвижного фосфора и нитратного азота характеризуется как низкое. Содержание валовых форм изучаемых элементов в почвах колеблется в пределах (мг/кг): железа (по Fe_2O_3) от 22340 до 172300; кобальта от 3 до 31; марганца (по MnO) от 253 до 6275; нике-

ля от 11 до 42; свинца от 5 до 45; цинка от 42 до 123 мг/кг; хрома от 61 до 171; мышьяка от 5 до 18 воздушно-сухой почвы.

Определение химических элементов в плодовых телах грибов осуществлялось рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре «Спектроскан Макс-GF1E».

На основе полученных данных было установлено, что способность накапливать в плодовых телах определённые химические элементы определяется, в первую очередь, биологическими особенностями гриба и является специфичной для каждого вида. Лишь для немногих видов макромицетов величина биоабсорбции находилась в тесной связи с содержанием химических элементов в субстрате. Так, наличие зависимости между высокой абсорбционной способностью по отношению к мышьяку и содержанием этого элемента в субстрате выявлено у гриба *Lepista nuda*, что наряду с широкой распространённостью и массовостью плодоношения позволяет рассматривать его как идеальный индикатор загрязнения окружающей среды мышьяком. В качестве индикатора загрязнения окружающей среды железом и цинком может быть предложен *Hirschioporus abietinus*, марганцем – *Auricularia mesenterica*, свинцом – *Lepista nebularis*.

Высококочувствительными объектами биоиндикации состояния окружающей среды являются лишайники. Их использование обусловлено чувствительностью фикобионтов лишайников к загрязняющим атмосферу веществам; отсутствием кутикулы и устьичного механизма, способствующих свободной диффузии газов и аэрозолей; медленным возобновлением таллома, приводящим к сохранению повреждений, вызванных влиянием поллютантов вплоть до гибели слоевища; строгими требованиями к кислотности субстрата, изменение которого способствует некрозам и гибели талломов. Удобными объектами биоиндикации территории ЗЗМ являются виды *Hypogymnia physodes* и *Ramalina pollinaria*. Результаты исследований свидетельствуют, что данные виды чувствительны к продуктам деструкции фосфорорганических отравляющих веществ (ФОВ), широко распространены на территории ЗЗМ, слоевища легко отделимы от субстратов. Наиболее чувствительным представителем к продуктам деструкции ФОВ в эксперименте является *Pseudoevernia furfuracea*. В связи с отсутствием данного вида на интересующей нас местности мы предлагаем трансплантировать на площадке ЗЗМ слоевища с экологически чистой территории заповедника «Верховья Суры».

Объектами биоиндикации могут служить и некоторые виды моховидных. В качестве объектов биоиндикации в районе исследований могут быть использованы три наиболее распространённых вида мхов – *Dicranum undulatum*, *Pleurocium schreberi* и *Stereodon pallescens*. Как показали наши исследования, перечисленные виды оказались чувствительными к таким веществам – продуктам деструкции ФОВ, как капролактамы и метилфосфоновая кислота (МФК). В частности, это выражалось в увеличении содержания в тканях мхов малонового диальдегида, являющегося вторичным продуктом перекисного окисления липидов.

Среди голосеменных растений видом, перспективным с точки зрения биоиндикации, является сосна обыкновенная (*Pinus silvestris*). Она широко распространена в ЗЗМ строящегося объекта УХО. Как показали наши исследования в местах прошлого УХО, химический стресс оказывает влияние не только на морфологические, но и физиолого-биохимические признаки данного вида, в частности, на накопление свободного пролина и электрохимические спектры изопероксидаз [9].

Из покрытосеменных наиболее удобным объектом биоиндикации является берёза повислая (*Betula pendula*), которая присутствует на большинстве точек пробоотбора в ЗЗМ объекта УХО. Берёза перспективна для оценки состояния окружающей среды с использованием показателя флуктуирующей асимметрии морфологических признаков. Кроме того, берёза представляет большой интерес для изучения воздействия неблагоприятных факторов на пигментные и ферментные системы.

В период с 2002-го по 2007 г. проводились исследования по изучению флуктуирующей асимметрии билатеральных морфологических признаков в популяциях рыб в право- и левобережье Пензенского водохранилища. Для оценки экологического состояния исследуемой территории нами были выбраны окунь обыкновенный (*Perca fluviatilis*) и ёрш обыкновенный (*Gymnocephalis cernuus*), являющиеся в данном водоёме фоновыми, доминирующими видами, размножающимися и кормящимися в прибрежной зоне [10]. Оценка стабильности развития по каждому признаку сводится к оценке асимметрии, что означает учёт различий в значениях признака слева и справа. Для меристического признака величина асимметрии у каждой особи определяется по различию числа билатеральных структур по сторонам. Популяционная оценка выражается средней

арифметической этой величины. Объём выборки для исследования составлял 20 особей. Для оценки уровня асимметрии признаков был осуществлён отлов рыбы в акватории Пензенского водохранилища, входящей в территорию ЗЗМ. Результаты говорят о неудовлетворительном состоянии популяций окуня правобережья Пензенского водохранилища в местах впадения р. Печарка, р. Аулька, р. Круглый. Состояние популяций ерша оказалось удовлетворительным. Удовлетворительный показатель стабильности развития популяции ерша можно объяснить большей выносливостью данного вида к загрязнениям и питанием на более глубоких местах. Более высокая чувствительность показателя флуктуирующей асимметрии окуня, большая численность, повсеместность распространения и несложная методика отлова позволяют нам считать данный вид оптимальным для биоиндикационных исследований в описываемой зоне. Результаты исследований согласуются с данными биотестирования и химического анализа, показавшими, что источниками загрязнения прибрежной зоны Пензенского водохранилища являются подводные ключи, питание которых связано с полигонами прежнего уничтожения химического оружия и очистными сооружениями.

Для расчёта показателя стабильности развития популяции на примере земноводных использовали лягушку озёрную (*Rana esculenta*). Земноводные являются удобным объектом при проведении биомониторинга. Так как амфибии обитают на границе двух сред – водной и наземной, состояние их организма в наиболее полной мере отражает состояние окружающей среды. Были проведены отловы лягушек в ЗЗМ объекта УХО в эстуариях р. Лямзый и р. Круглый. Рассчитанные показатели асимметрии указывают на критическое состояние популяций данного вида в изучаемой зоне.

Интересна возможность использования птиц в качестве индикаторов состояния среды. О превышении норм антропогенной нагрузки может свидетельствовать снижение их численности, примеры таких фактов встречаются в литературе [11]. Оценены видовой состав и плотность населения птиц в районе ст. Леонидовка. Для исследований авиафауны выбраны два наиболее показательных маршрута по границе санитарной защитной зоны (СЗЗ). Были определены состав видов птиц, их относительная численность, плотность населения и доля каждого вида от суммарной плотности [12]. Из 40 обнаруженных видов на пер-

вом маршруте преобладает лесной конёк (*Anthus trivialis*), а на втором (из 41) – зяблик (*Fringilla coelebs*). В дальнейшем эти виды и ряд других, наиболее обычных здесь птиц будут использованы как модельные объекты для слежения за состоянием авиафауны.

Не менее показательным объектом для мониторинговых исследований состояния фауны служат млекопитающие. Эта группа заслуживает особого внимания, являясь исключительно информативной как с позиций исследования разнообразия, обилия и распространения, так и в качестве объекта для молекулярно-генетических исследований.

В районе ст. Леонидовка установлено обитание более 30 видов млекопитающих, относящихся к 6-ти отрядам: насекомоядных, рукокрылых, зайцеобразных, грызунов, хищных, парнокопытных [13]. Доминируют на всех маршрутах и, что важно, строго сохраняют видовое представительство, при закономерных колебаниях видовой динамики определяемых спецификой биотопов, грызуны, а субдоминантами служат насекомоядные. В связи с этим для проведения экологического и генетического мониторинга популяций грызунов и насекомоядных проведён отлов модельных видов, которыми являются рыжая полёвка (*Clethrionomus glareolus*) и обыкновенная бурозубка (*Sorex araneus*) и, как дополнительные, жёлтогорлая мышь (*Apodemus flavicollis*), лесная мышь (*Apodemus uralensis*) и полевая мышь (*Apodemus agrarius*).

Частота встречаемости клеток с хромосомными aberrациями в костном мозге мелких млекопитающих является важной характеристикой генотоксических свойств среды [14, 15]. Этот вид анализа хромосомного аппарата клетки давно и с успехом применяется для тестирования мутагенных свойств различных веществ как в лабораторных условиях, так и при анализе природных популяций грызунов, испытывающих антропогенные воздействия разных уровней. Исследование мелких млекопитающих как модельных объектов генотоксического мониторинга можно использовать и для косвенного определения степени генетической опасности загрязняющих веществ, поскольку массовое обследование людей с этой целью – дорогой и сложный в методическом отношении процесс. Дело в том, что благодаря высокой интенсивности метаболизма поллютанты в органах и тканях мелких млекопитающих накапливаются значительно быстрее, чем у крупных животных. С использованием стандартных методик [16] проанализированы

кариотипы индикаторных видов: обыкновенной бурозубки и обыкновенной полёвки, а в качестве дополнительных – рыжей полёвки и лесной мыши. В дальнейшем, при проведении цитогенетического мониторинга и оценки частоты хромосомных aberrаций предполагается исследование до 100 метафазных пластинок от каждого животного, в которых будет проведён подсчёт делеций, транслокаций, инверсий, анеуплоидных клеток.

Изучен генетический полиморфизм в популяциях рыжей полёвки (*Clethrionomus glareolus*), жёлтогорлой мыши (*Apodemus flavicollis*), полевой мыши (*Apodemus agrarius*). Полиморфизм ДНК изучается посредством клонирования отдельных её участков в процессе полимеразной цепной реакции (метод RAPD-PCR). Выяснено, что на данном этапе во всех популяциях отмечается средний или высокий уровень гетерозиготности и высокий уровень генетического полиморфизма. Эти данные подтверждают удачность выбора объектов – индикаторов для мониторинга генотоксических свойств среды и указывают на широкие аналитические возможности при использовании избранного метода молекулярно-генетического анализа.

Считается, что наиболее чувствительным показателем влияния загрязнения окружающей среды на организм является состояние иммунной системы человека и животных. Поэтому методы оценки состояния иммунной системы (особенно в динамике) оказываются весьма информативными даже в том случае, когда никакими другими тестами выявить неблагоприятное воздействие токсиканта не удаётся.

Наиболее удобными объектами для исследования влияния загрязнения окружающей среды на иммунобиологический статус являются лабораторные животные (мыши или крысы), которые позволяют изучать влияние алиментарного фактора (воды, растительного корма и т. п.) на развитие иммунной системы организма и при этом моделировать различные факторы окружающей среды. Исследования на лабораторных крысах позволяют получить результаты, наиболее точно отражающие воздействие загрязнения окружающей среды на организм человека, так как многие биохимические процессы, протекающие в организме человека и крысы, сходны. Причём по скорости биохимических процессов одна неделя жизни крысы соответствует 39 неделям жизни человека, что позволяет давать достоверный долгосрочный прогноз. Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, с которой

активно сотрудничает РЦГЭЖиМ по Пензенской области, располагает оборудованным вариантом, где проводятся исследования влияния спектра факторов на различные органы и системы крыс. Использование линейных крыс (линии Wistar) и современных методов биохимических, гистологических и иммунологических исследований позволяет получать достоверные результаты.

Достаточно объективную экологическую оценку дают исследования комплекса клеточного и гуморального звеньев иммунной системы, а также системы неспецифической защиты организма.

Кроме лабораторных животных, в качестве объекта биоиндикации может быть использован крупный рогатый скот. В ходе исследований, проводившихся под руководством профессора Г.И. Боряева, изучался иммунобиологический статус животных, выпасавшихся близ мест прежнего уничтожения химического оружия [17]. В результате был установлен ряд отклонений от нормы по следующим параметрам:

- относительному и абсолютному содержанию Т-лимфоцитов в периферической крови (клеточное звено иммунитета);
- фагоцитарной активности нейтрофилов и макрофагов (состояние фагоцитарной защиты организма);
- относительному и абсолютному содержанию В-лимфоцитов в периферической крови, отвечающих за синтез иммуноглобулинов;
- концентрации иммуноглобулинов G-, M- и A-изотопов в сыворотке крови (гуморальное звено иммунитета);
- бактерицидной активности сыворотки крови.

Таким образом, в ходе проведённых исследований был определён круг видов, перспективных с точки зрения использования в биоиндикации. Широкий спектр таксонов, к которым они относятся, позволяет оценивать воздействие химического загрязнения на биоту в целом и прогнозировать возможность изменений. Результаты проведённых исследований свидетельствуют о том, что наиболее предпочтительными являются методики, связанные с определением биохимических показателей состояния организмов, как наиболее точно определяемые и близкие к аналитическим. В связи с этим следует рекомендовать разработку и внедрение методик подобного плана, что даст возможность оптимизировать мероприятия, проводимые в рамках мониторинга СЗЗ и ЗММ объектов УХО и других антропогенно нарушенных территорий.

Литература

1. Захаров В.М. Здоровье среды: методика оценки. М.: Центр экологической политики России. 2000. 184 с.
2. Чистякова А.А., Куликовский М.С. Влияние химического загрязнения на альгофлору озера Моховое // Экологические проблемы наследия «холодной войны» и пути их преодоления. Мат-лы междунар. конф., Пенза, июнь 2003 г. Пенза, 2004. С. 85-89.
3. Barber H.G., Carter J.A. Observations on some deformities found in British diatoms // *Microscopy*, V. 34, №3, 1981. P. 214-226.
4. Гололобова М.А., Белякова Г.А. Некоторые уродливые формы диатомовых из Коссинских озёр (Москва) // *Бот. Журн.*, Т. 85, №10, 2000. С. 39-42.
5. Гельцер Ю.Г. Простейшие (Protozoa) как компонент почвенной биоты (систематика, экология) // М.: Изд. МГУ, 1993. 175 с.
6. Мазей Ю.А., Ембулаева Е.А., Бубнова О.А. Почвенная нанофауна как объект экологического мониторинга. Геобионтные раковинные амёбы // Мониторинг природных экосистем в зонах защитных мероприятий объектов по уничтожению химического оружия: сб. ст. Всеросс. науч.-прак. конф., Пенза, май 2007 г. Пенза, 2007. С. 105-113.
7. Gast C.H., Jansen E, Bierling J., Haanstra L. Heavy metals in mushrooms and their relationship with soil characteristics // *Chemosphere*. Vol. 17(4). 1988. P. 789-799.
8. Kuusi T. Lead, Laaksovirta, H. Liukkonen-Lilja, M. Lodenius, S. Piepponen Cadmium, and mercury contents of fungi in the Helsinki // *Annales Botanici Fennici*, Vol. 16. 1981. P. 208-212.
9. Иванов А.И., Мазей Ю.А., Ильин Д.Ю., Ильина Г.В. Методы биоиндикации и биотестирования в оценке фонового состояния акватории Пензенского водохранилища // Проблемы охраны и экологического мониторинга природных ландшафтов и биоразнообразия: Сб. статей Всеросс. науч.-прак. конф., Пенза, май 2006. С. 34-37.
10. Ильин В.Ю., Янкин А.В. Русловые переливные плотины верхнего течения реки Суры и их влияние на размещение ихтиофауны // Проблемы охраны и экологического мониторинга природных ландшафтов и биоразнообразия: Сб. статей Всеросс. науч.-прак. конф., Пенза, май 2006. С. 42-46.
11. Кустов Ю.И. Индикаторная роль птиц на изменение состояния окружающей среды // Региональные эколого-фаунистические исследования как научная основа фаунистического мониторинга, охраны и рационального использования животных. Курск, 1990. С. 97-98.
12. Муравьев И.В., Лукьянова И.Ю. Птицы зоны защитных мероприятий объекта по уничтожению химического оружия в окрестностях станции Леоново Пензенской области // Мониторинг природных экосистем в зонах защитных мероприятий

объектов по уничтожению химического оружия: сб. ст. Всеросс. науч.-прак. конф., Пенза, май 2007 г. С. 123-129.

13. Ильин В.Ю., Золина Н.Ф., Курмаева Н.М. Млекопитающие зоны защитных мероприятий объекта по уничтожению химического оружия в Пензенской области // Мониторинг природных экосистем в зонах защитных мероприятий объектов по уничтожению химического оружия: сб.ст. Всеросс. науч.-прак. конф., Пенза, май 2007 г. Пенза, 2007. С. 69-71.

14. Гилева Э.А., Косарева Н.Л., Любашевский Н.М., Бахтиярова М.Ф. Изменчивость частоты хромосомных нарушений, индуцированных антропо-

генными поллютантами, у домовых мыши из Гиссарской долины // Экология, №1, 1993. С. 62-70.

15. Дмитриев С.Г. Цитогенетическая нестабильность у трёх видов грызунов в районе химического предприятия на севере России // Экология, №6, 1997. С. 447-451.

16. Графодатский А.С. Раджабли С.И. Хромосомы сельскохозяйственных и лабораторных млекопитающих // Атлас. Новосибирск, Наука, 1988. 128 с.

17. Боряев, Г.И. Методика определения влияния загрязнения окружающей среды на иммунобиологический статус животных // Экологические проблемы наследия «холодной войны» и пути их преодоления. Мат-лы междунар. конф., Пенза, июнь 2003 г. Пенза, 2004. С. 16-20.

УДК 631.466.3:631.453

Метилфосфоновая кислота как регулятор биологических процессов в экологических системах: действие на микроорганизмы, ферментативную активность и высшие растения

© 2007. Т.Я. Ашихмина, Л.В. Кондакова, Л.И. Домрачева, С.Ю. Огородникова
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН

Показано, что под влиянием метилфосфоновой кислоты (МФК) происходит изменение в численности, видовом и групповом составе фототрофных микробных комплексов почвы, а также изменяется популяционная и видовая плотность природных биоплёнок *Nostoc commune*. Обсуждается возможность использования цианобактерий для биотестирования на содержание МФК с помощью тетразольно-топографического метода. Доказана неоднозначность действия МФК на всхожесть и линейные размеры проростков различных сельскохозяйственных культур.

It is shown that under the influence of methylphosphonic acid (MPA) there take place some changes in the quantity, species and group composition of phototrophic microbe soil complexes as well as in the population and species density of natural *Nostoc commune* bio-films. The possibility of using cyanobacteria in bio-testing of MPA content using tetrasole-topographic method is discussed. The ambiguity of MPA influence on germination and linear size of the seedlings of different agricultures is proved

Проблема безопасного для окружающей среды уничтожения химического оружия сохраняет свою актуальность в течение всего периода эксплуатации объектов уничтожения химического оружия. В связи с этим на каждом этапе эксплуатации объекта и уничтожения различных специфических отравляющих веществ возрастает необходимость проведения исследований по изучению воздействия их на живые организмы и разработке и внедрению новых методов мониторинга природной среды. Этим целям подчинены исследования, проводимые в лаборатории биомониторинга Института биологии Коми НЦ УрО РАН и ВятГГУ, созданной в 1990 г. Лаборатория, в частности, специализируется на

разработке методов мониторинга природной среды и объектов, в том числе выполняются научно-исследовательские работы по изучению воздействия поллютантов (ТМ, мышьяка, метилфосфоновой кислоты, пиррофосфатов) на различные компоненты природной среды. Используя диапазоны концентраций этих соединений в природной среде и модельных опытах (*in vivo* и *in vitro*), определяют порог толерантности к ним организмов разной систематической принадлежности. В данной работе исследования проводились с метилфосфоновой кислотой (МФК), которая является конечным продуктом гидролиза и универсальным маркером фосфорорганических отравляющих веществ. Это кристалли-