

Биоиндикация и биомониторинг континентальных водоемов Дальнего Востока как способ оценки экологического состояния среды

В.Н.Воропаев, С.А.Маракушев, Л.М.Павлова, Н.Г.Куимова

(Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Амурский комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН)

При оценке состояния среды возникает ряд проблем, связанных с выбором методики и с масштабом (размером и субординационным положением) характеризующих объектов. Традиционная методика, основанная на определении предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ (ПДК), давно себя изжила по следующим причинам.

Во-первых, она ориентирована с сугубо эгоистических позиций только на один компонент среды - человека. Используя для характеристики среды значения концентрации в воздухе, воде и продуктах питания веществ и патогенных микроорганизмов, способных нанести физиологический вред только человеку, санитарно-эпидемиологические службы, а за ними и природоохранные органы искусственно вычлняют человека из природы, как бы отчуждая его от нее. Последствия такой "стратегии" катастрофичны. Ориентируясь в оценке состояния среды только на ПДК, человек создает для себя новую, деградированную среду обитания, в которой все ее компоненты - геологический, гидрогеологический, метеорологический, и биологический - будут искажены до неузнаваемости, потеряют миллионлетиями сложившиеся между ними органические связи, разрушится внутренняя структура биосферы на всех субординационных уровнях, сократится видовое разнообразие биоценозов.

Во-вторых, даже по отношению к человеку фиксированные значения ПДК не отражают реакции на эти концентрации каждого отдельного индивидуума, так как возможности иммунной системы (т.е. способности нейтрализовать вредные воздействия без последствий) зависят от возраста, пола, расовой принадлежности человека, природно-климатической среды обитания, социальной атмосферы в обществе и т.д.). Усреднение этого показателя в масштабах любого региона, а тем более такого гигантского как Дальний Восток, равнозначно усреднению температуры больных по больнице. Таким образом, невольно напрашивается вывод, что при использовании ПДК в качестве основного показателя состояния среды обитания человека вероятность получения искаженного и даже ложного представления очень велика.

Еще одним недостатком ПДК является сложность определения характера воздействия на человека вредных компонентов в зависимости от изменения их концентрации во времени. Дискретность поступления загрязняющих веществ в ограниченный объем пространства, рассматриваемый как точка, наложенная на

дискретность процесса замера, делает практически невозможным получение достоверной информации. Единственно корректный в этом случае метод непрерывного замера сложен с технической точки зрения и очень дорог. А теперь возьмите заполненное этими точками трехмерное пространство с постоянно меняющимися физическими параметрами среды, возникающими в нем конвективными потоками, и вы поймете насколько сложна и практически неразрешима задача оценки состояния среды с использованием в качестве репера ПДК.

Возникает естественный вопрос: "Что же в таком случае использовать для характеристики среды обитания человека и какими показателями характеризовать районы безлюдные, где человек практически не живет и появляется эпизодически?" В разрешении этого вопроса реальную помощь может оказать системный подход. Разработанная схема строения мира, основанная на субординационном принципе соотношения материальных объектов, позволяет выявить главный, второстепенный, третьестепенный и т.д. уровни организации материальных объектов, определить главный, второстепенный, третьестепенный и т.д. уровни форм движения материи, определить науки, которые будут изучать данные формы движения и, соответственно, подобрать методики, которые позволят получить наиболее полную и достоверную характеристику исследуемых объектов.

В соответствии с этой схемой в органическом мире по восходящей выделяются следующие субординационные уровни: молекулярный, клеточный, организмов, биоценозов, биолокусов, биозон, биосферы. Объекты низшего уровня являются составными элементами, как бы блоками, из которых слагаются объекты уровня, расположенного в субординационном отношении выше. Таким образом, характеристика состояния контролируемого объекта будет зависеть:

- 1) от количества разновидностей блоков;
- 2) от количества внутри объекта каждой отдельной разновидности;
- 3) от характеристик качества каждой отдельной разновидности;
- 4) от внутренней структуры объекта, т.е. от пространственного взаиморасположения слагающих его блоков.

Пренебрежение любым из четырех вышеперечисленных параметров приводит к нарушению оптимального режима существования, к выходу объекта из стабильного состояния, к постепенной деградации и, в конечном итоге, к распаду и гибели объекта.

Следовательно, контроль именно этих параметров позволяет получить наиболее достоверную информацию о состоянии объекта. Средой обитания конкретного человека является конкретный биогеоценоз, состоящий из биотопа и биоценоза. Одним из составных элементов ("блоком") биоценоза будет данный человек. Согласно вышеприведенному критерию оценки состояния контролируемого объекта конкретный биоценоз как устойчивая структурная единица будет зависеть:

- 1) от количества видов, входящих как составные элементы в данный биоценоз;
- 2) количества в абсолютном исчислении каждого отдельного вида;
- 3) от характеристик качества каждого отдельного вида, что в рамках биоценоза будет выражаться как интегральный коэффициент здоровья вида, входящего в качестве элемента в данный биоценоз;
- 4) от внутренней структуры конкретного биоценоза, т.е. от пространственного взаиморасположения входящих в его состав элементов - организмов.

Биотоп, как относительно однородное по абиотическим характеристикам пространство среды, занятое биоценозом, состоит из следующих блоков: атмосферного, гидросферного, литосферного и блока физических полей. Все эти блоки находятся в органической связи с биоценозом, т.к. он черпает из этих блоков необходимые для своего существования вещество и энергию. При этом градиент изменения этих блоков во времени не должен превышать градиента эволюционного изменения во времени самого биоценоза. Ибо в противном случае элементы биоценоза - организмы, не сумевшие эволюционировать и приспособиться к изменившимся условиям - деградируют и в итоге гибнут. При этом нарушается структура биоценоза и внутренние трофические цепи, что в конечном счете ведет к деградации и гибели старого биоценоза с образованием нового.

Таким образом, универсальным и наиболее чутким показателем состояния биотопа будет существующий в его пределах биоценоз. Отсюда вытекает логический вывод, что для контроля за состоянием среды обитания человека наиболее корректным и достоверным будет комплекс методов, включающих биоиндикацию и биомониторинг.

Одним из важнейших фрагментов биотопа является гидросферный блок. Будучи средой химически активной и динамичной, вода, с одной стороны, растворяя органические, твердые минеральные и газообразные вещества, может легко изменять свой состав; с другой стороны, перемещаясь в пространстве и взаимодействуя с другими компонентами среды, вода проявляет качества наиболее активного, агрессивного

фактора, воздействующего на эти компоненты, изменяющего как их, так и среду в целом. Все изменения, происходящие в атмосфере, литосфере и физических полях, вода отражает, изменяя свой состав и динамический режим. В свою очередь, взаимодействуя с составными элементами биосферы - организмами, вода активно действует на показатели их здоровья, их продуктивность и на состав биоценозов, которые эти организмы формируют. Изменения, происходящие в гидросфере, наиболее сильное воздействие оказывают на водные организмы, следовательно, именно гидробионты будут наиболее чутко реагировать на изменения состояния среды и именно их целесообразнее использовать в качестве биоиндикаторов. Преимущества водных организмов в этой роли заключаются не только в их относительно высокой чувствительности, но и, во-первых, в возможности непрерывно реагировать на воздействие среды, так как гидробионты постоянно контактируют с водной средой своими покровными тканями, пропускают ее через жабры и органы пищеварения; во-вторых, они могут при дискретном поступлении в среду загрязняющих веществ "регистрировать" суммарный эффект изменением количества входящих в биоценоз видов, количеством особей каждого отдельного вида, интегральным коэффициентом здоровья вида, входящего в данный биоценоз; о характере влияния окружающей Среды можно судить и по накоплению загрязняющих веществ в определенных частях тела организмов-биоиндикаторов, по изменению внутренней структуры биоценозов. Преимущества водных биоценозов также в том, что на них в меньшей степени, чем на наземные организмы влияют природно-климатические условия, связанные с широтной зональностью и корреляцию по ним можно, следовательно, проводить с большей степенью достоверности.

При разработке методики биоиндикации и биомониторинга континентальных водоемов Дальнего Востока на первом этапе внимание было акцентировано на тяжелых металлах как на загрязнителе, приводящем к наиболее тяжким последствиям для среды обитания человека. В качестве объектов биомониторинга использовались как макро-, так и микробиоценозы. При проведении этапа микробиологического мониторинга, ориентированного на установление коррелятивной связи между количеством микроорганизмов и степенью загрязненности среды, процесс развития микроорганизмов изучался на временном отрезке, разделенном на семь последовательных периодов: начальная стационарная фаза, лаг-ускорение, логарифмический рост, замедление роста, стационарное состояние, ускоренное отмирание,

логарифмическое отмирание. При определенном недостатке в природной среде питательных веществ и жизненно необходимых элементов для популяции микроорганизмов они достигали фазы стационарного состояния с 2-4% клеток, способных к образованию колоний (Ribbous D. W., Dames E.A., 1963). В этом случае происходило периодическое балансирование аналитических и синтетических процессов в фазе отмирания, которая и представляется наиболее важной на этом этапе микробиологического мониторинга. Микроорганизмы отбирались из водной среды, из речного ила и с поверхности частиц самородных металлов, отобранных из шлихов аллювиальных осадков. Еще одним показателем содержания тяжелых металлов служил уровень азотфиксирующей активности (Бабьева И.П., Зенова Т.М., 1983), для чего делались посеvy на среду Эшби для выделения азотобактера. Анализ количества микроорганизмов показал, что: общее содержание микроорганизмов в воде меньше, чем в речном иле; в водоемах, загрязненных техногенной ртутью и другими тяжелыми металлами, существенно снижалось общее содержание микроорганизмов. Ингибирующее влияние тяжелых металлов на жизнеспособность и рост микроорганизмов наблюдалось при следующих концентрациях Hg^{2+} и Ag^+ для различных микроорганизмов $10 \cdot 10^{-6}$ М: Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , N^{2+} , Zn^{2+} для бактерий - $10^{-4} - 10^{-6}$ М; для тионовых бактерий - $10^{-2} - 10^{-3}$ М; для цианобактерий - $10^{-6} - 10^{-7}$ М; для водорослей - $10^{-5} - 10^{-7}$ М, что вполне согласуется с данными других исследователей (Сенцов, Максимов, 1985). Наиболее чувствительными к действию тяжелых металлов оказались цианобактерии и водоросли. В ряду металлов токсичность для микроорганизмов росла в следующей последовательности: Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} . Действие тяжелых металлов в сублетальных концентрациях проявлялось: в одних случаях - в задержке роста биомассы на начальном этапе с последующим увеличением скорости роста до нормальных величин; в других случаях скорость роста и биомасса постоянно были ниже нормы. Для некоторых микроорганизмов низкие концентрации Hg^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} и др. активизировали рост и течение метаболических процессов, а при более высоких концентрациях эти элементы становились токсичными. Значения критических и пороговых концентраций тяжелых металлов имели различную величину для каждого вида микроорганизмов. Основным критерием токсичности тяжелых металлов являлась форма его присутствия в среде, зависящая от анионов, с которыми они образуют молекулу, или органических соединений, в состав которых они входят; от температуры, давления, рН среды и ряда других факторов, влияющих на

концентрацию металлов в микроорганизмах. Концентрация металлов в определенных участках и распределение этих участков внутри клетки определяли характер нарушения ее ультраструктуры и ингибировали определенные процессы метаболизма. Так, например, исследованные микроорганизмы связывали практически все органические и неорганические соединения одного из наиболее токсичных металлов - ртути, которая является мощным ингибитором ферментов. Однако фенотипические характеристики позволили определить лишь фоновые концентрации тяжелых металлов, а задача обнаружения залповых выбросов в связи с высокой репродуктивностью микроорганизмов оказалась практически неразрешимой.

Более перспективным представляется метод, основанный на определении генотипических характеристик, позволяющий дать ретроспективную оценку загрязнения. Гены, кодирующие признак устойчивости к тяжелым металлам, находятся как в хромосомах, так и во внехромосомных элементах генетического аппарата. Повышение устойчивости популяции микроорганизмов к тяжелым металлам происходит путем передачи пенициллиназных плазмид и плазмид R-фактора, а также в результате отбора устойчивых мутантов. У некоторых грамм-отрицательных бактерий обнаружены транспозоны, несущие детерминанты устойчивости к Hg^{2+} и ртутьорганическим соединениям. Обмен генами устойчивости происходит не только между клетками разных штаммов одного рода, но и между бактериями разных родов. Благодаря этим генам бактерии получают уникальную ферментативную защиту от соединений ртути. В процессе биогенной трансформации соединений ртути и переводе ее в нетоксичную форму Hg^0 важная роль отводится ртутьредуктазе NADP - (никотинамиддинуклеотидфосфат). Разработанная методика определения ртутьредуктазной активности, основанная на анализе разности спектров поглощения NADP⁺ и NADPH, позволила ретроспективно оценивать динамику изменения концентраций соединений ртути в континентальных водоемах и проводить биомониторинг среды с использованием микробиологических индикаторов.

При изучении биоценозов водоемов Дальнего Востока было обращено внимание на неблагоприятное состояние ихтиофауны, являющейся важным звеном в трофической цепи человека. В реках и озерах, подвергшихся сильному антропогенному воздействию, резко сократилось количество видов рыб, сохранившиеся виды уменьшились в абсолютном исчислении, увеличилось процентное содержание больных особей, породы ценных промысловых рыб заместились рыбой сорной. Для установления

причин этого явления было проведено исследование содержания в рыбе тяжелых металлов. Исследовано пять видов рыб: из хищных - щука, сом, ленок; из нехищных - карась и гольян. Из тяжелых металлов определялись: ртуть, свинец, кадмий, цинк, медь, никель. Учитывая, что из всех органов наибольшие содержания тяжелых металлов отмечались в печени и жабрах рыб, именно эти органы были использованы для определения концентрации и полученные результаты по ним подвергались статистическому анализу. Контроль за содержанием тяжелых металлов в рыбной продукции приобрел особую актуальность после трагедии в японской провинции Минимата Бей в 1950 году, когда большое количество людей умерло после длительного употребления в пищу рыбы, содержащей высокие концентрации метилртути, сброшенной в море как отходы производства (Tsubari T., Irukauma K. 1977).

При проведении гидрогеохимических исследований в бассейнах рек Деп и Гарь Амурской области превышений ПДК тяжелых металлов в образцах воды установлено не было, в то время, как результаты исследования концентрации тяжелых металлов в печени различных видов рыб, выловленных там же, показали, что даже по отношению к такому реперу как ПДК положение не представляется благополучным (рис. 1). По меди, цинку и ртути концентрации металлов у всех исследованных видов или близки к ПДК, или его превышают. Анализ площадного распределения рыб, содержащих повышенные концентрации меди, цинка и свинца, показал пространственную приуроченность их к природным геохимическим

аномалиям. С ртутью дело оказалось сложнее. На природные геохимические аномалии, создаваемые проявлениями киновари, накладывались аномалии техногенного характера. Комплекс исследований, включающий ихтиологический и микробиологический мониторинг, позволил установить, что в районе наиболее интенсивной разработки россыпей золота в верховье реки Желтулак отмечается наибольшая загрязненность среды ртутью. Содержание в шлихах аллювия амальгамы и металлической ртути было очень высоким. Выявить "вклад" каждого из факторов в процесс заражения рыб ртутью представляется возможным лишь после проведения специальных дополнительных исследований.

Проблема заражения малых рек Дальнего Востока техногенной ртутью носит региональный характер и связана с повсеместным применением в золотодобыче, в недалеком прошлом, технологии амальгамирования. Количество техногенной ртути, сброшенной в природную среду в районах золотодобычи Дальнего Востока, по оценкам ряда ученых, составило несколько тысяч тонн. Это бомба замедленного действия, которая ставит под угрозу существование не только водных биоценозов, но и биоценозов наземных, составной частью которых является человек.

Проведенные исследования ихтиофауны на содержание тяжелых металлов показали, что рыбы являются чутким биоиндикатором состояния среды. Они позволяют выявить не только техногенные, но и природные геохимические аномалии, а это поможет, в дополнение к разработке комплекса природоохранных мероприятий для районов с

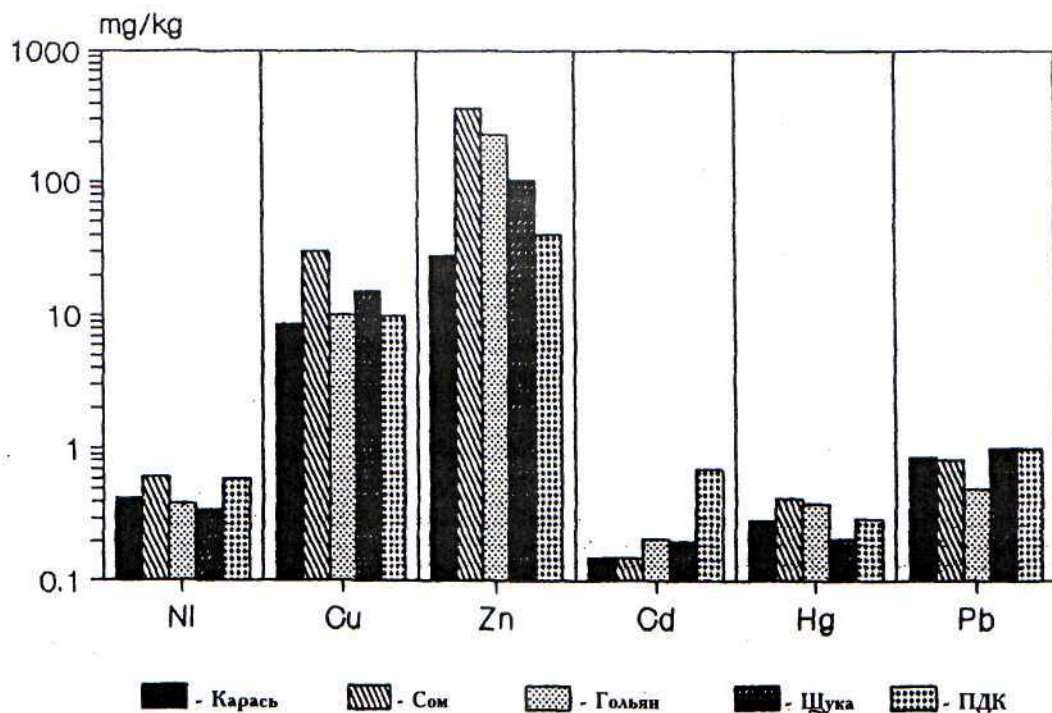


Рис.1. Содержание тяжелых металлов в печени различных видов рыб малых рек Амурской области

развитой промышленностью и сельским хозяйством, разработать рекомендации также и для районов неосвоенных, например, исходя из оценки возможности использования тех или иных видов рыбы в пищу.

В результате проведенной работы была подтверждена точка зрения других исследователей, что организмы являются концентраторами ряда элементов, в том числе и тяжелых металлов, и чем дальше в трофической цепи стоит организм, тем больше он подвержен действию загрязнителя. Последний тезис находит свое подтверждение в том, что печень хищной рыбы сом содержала большие концентрации, меди, цинка, свинца, никеля, ртути, чем печень нехищных карася и гольяна.

Использование для контроля за состоянием среды биоиндикаторов позволило на ранней стадии, когда концентрации тяжелых металлов в водной среде еще не превысили ПДК, выявить аномалии загрязняющих веществ и оценить реальную опасность, которую они представляют для биоценозов и человека.

Не вызывает сомнения, что будущее - за биоиндикацией и биомониторингом состояния среды, но для этого необходима серьезная предварительная работа. Для каждого региона, в пределах которого организуется система биомониторинга, необходимо:

- выделить внутри каждого субординационного уровня живой природы объекты контроля,

которые будут представительными для характеристики данной территории и данного уровня, так, например, для контролируемого биологуса необходимо подобрать представительные биоценозы, а для биоценоза - перечень представительных организмов-биоиндикаторов, причем возможен и специализированный подход к выбору организмов на каждый вид загрязнителя;

- необходимо подобрать комплекс методик, провести их стандартизацию и внедрить в практику контроля за состоянием объектов;

- массив информации должен поступать с разветвленной сети научно-исследовательских полигонов и подвергаться обработке путем иерархического синтеза по ГИС-технологии, при этом наряду с традиционными должны применяться и методы дистанционного зондирования.

Литература

1. Ribbons D.W., Dames E.A. Environmental and growth conditions affecting the endogenesis metabolism of bacteria, *Ann.№4 Acad. Sci.*, 102, p. 564-568.
2. Бабьева И.П., Зенова Т.М., Биология почв. Изд-во МГУ, 1983, с.225.
3. Сенцов О.Ю., Максимов В.И., Действие тяжелых металлов на микроорганизмы // *Успехи микробиологии*, Т.2, 1985, с.227-252.
4. Tsubari T., Irukayama K. *Minimata disease*, Amsterdam, Elsevier, 1977, 317p.

Bioindication and biomonitoring of Far-Eastern continental pools as a method to evaluate ecological state of the environment

V.N.Voropaev, S.A.Marakushev, L.M.Pavlova, N.G.Kuimova

The work emphasizes the necessity to refuse of concentrations admissibly limited (CAL) which are considered as an indicator of human environment state. Bioindication and biomonitoring are taken as alternative to CAL.

Necessity to change criteria of environment state evaluation is easy to prove if the system approach is used, the system approach and material world scheme built by subordinational principle.

A human being is considered as a part of the biocenosis within the biotop - limited environmental space. Biotop has the hydrosphere block as the most important part. Microbiological and ichthyological monitoring is proposed to be used for characterization of this hydrosphere block within the biotop.

Using the example of Far-Eastern rivers, possibilities of these methods are shown. They are used to control over the polluted by heavy metals environment. It is presupposed that there will be the system of researching grounds which will give the information of the environment state and this information will be treated by GIS (geo-information system) technology.