

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРЭСНОВОДНОЙ ГИДРОЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

*О.В. Хурина, Л.Н. Саушкина (КамчатГТУ),  
Т.И. Кузякина (НИГТЦ ДВО РАН)*

*В статье рассматриваются вопросы, связанные с изучением химических и микробиологических процессов, происходящих в загрязненных водоемах, на примере оз. Кудучное (Камчатка), являющихся критериями оценки экологического состояния экосистемы, а также процессов самоочищения. Показано, что основная роль в самоочищении водоема и трансформации загрязняющих веществ в нем принадлежит микроорганизмам различных физиологических групп.*

*The problems of chemical and microbiological processes taking place in polluted basins which are the criteria of ecological condition ecosystem estimation as well as processes of self cleaning are shown on the example of Kultuchnoe lake (Kamchatka). The main role in self cleaning of basins and polluting substances transformation belongs to microorganisms of different physiological groups.*

Одной из важнейших причин современных экологических проблем является всевозрастающее загрязнение природной среды. Под загрязнением природной среды следует понимать «изменение свойств среды (химических, механических, физических, биологических и связанных с ними информационных), происходящие в результате естественных или искусственных процессов и приводящие к ухудшению функций среды по отношению к любому биологическому или технологическому объекту» [1]. Используя различные элементы окружающей среды в своей деятельности, человек изменяет ее качество. Часто эти изменения выражаются в неблагоприятной форме загрязнения.

Особое значение имеет загрязнение поверхностных и подземных вод. Под загрязнением поверхностных и подземных вод понимают любые изменения физических, химических и биологических свойств воды в водоемах в связи со сбрасыванием в них жидких, твердых и газообразных веществ, которые причиняют или могут создать неудобства, делая воду данных водоемов опасной для использования, нанося ущерб народному хозяйству, здоровью и безопасности населения. Источниками загрязнения признаются объекты, с которых осуществляется сброс или иное поступление в водные объекты вредных веществ, ухудшающих качество поверхностных вод, ограничивающих их использование, а также негативно влияющих на состояние дна и береговых водных объектов.

Одним из источников загрязнения водных объектов являются сточные воды – бытовые и промышленные, которые, попадая в водоем, существенно влияют на его режим. Поступление в водоемы сточных вод приводит к негативным последствиям, и даже незначительное воздействие обуславливает заметные экологические изменения. Происходят изменения физических свойств и химического состава воды водоема и населяющих его организмов.

По мере поступления органических и биогенных веществ происходит постепенное изменение химического состава воды, видового состава гидробионтов, происходит перестройка структуры и функций экосистемы в целом. В начале процесса загрязнения изменения в экосистеме незначительны и обратимы. В дальнейшем экосистема увеличивает свою способность к переработке поступающих веществ, но до определенного предела. Его превышение приводит к деградации и полному разрушению экосистемы.

Важное последствие бытового загрязнения вытекает из того, что коммунальные сточные воды, кроме большого количества органических веществ, несут и много биогенных элементов. Результатом этого становится антропогенное эвтрофирование водоемов и водотоков [2]. Ряд авторов разделяет эвтрофирование – естественный процесс старения экосистем водоемов и эвтрофикацию, антропогенную или экспериментальную. Главными агентами эвтрофирования могут выступать соединения азота и фосфора, главным образом, в виде нитратов и фосфатов.

При эвтрофировании водная экосистема последовательно проходит несколько стадий. Сначала происходит накопление минеральных солей азота и/или фосфора в воде. Эта стадия, как правило, непродолжительна, так как поступающий лимитирующий элемент немедленно вовлекается в кругооборот и наступает стадия интенсивного развития водорослей в эпилимнионе. Нарастает биомасса фитопланктона, увеличивается мутность воды, повышается концентрация кислорода в верхних слоях воды. Затем наступает стадия отмирания водорослей, происходят

аэробная деградация детрита, образование хемоклина. Интенсивно отлагаются донные илы с повышенным содержанием органики. Отмечаются изменения зооценоза.

Наконец, наступает полное исчезновение кислорода в глубинных слоях и начинается анаэробное брожение. Характерно образование сероводорода, сераорганических соединений и аммиака.

Круговорот органических веществ тесно связан с круговоротом отдельных биогенных элементов, особенно с круговоротом углерода и азота, а также серы, железа, фосфора, марганца и других и складывается из двух процессов: синтеза этого вещества (и/или его продукции) и его минерализации или деструкции (распада) до простых минеральных соединений – биогенов. Бактерии принимают активное участие в этих процессах.

Деструкция органического вещества происходит во всей водной массе: органические вещества, прежде чем опуститься на дно, проходят через водную массу, при этом значительная часть их подвергается минерализации.

Различные физиологические группы микроорганизмов осуществляют деструкцию отдельных углерод-, азот- и фосфорсодержащих органических веществ как в толще воды, так и в иловых отложениях, используя их в качестве источников питания и энергии. В результате деструкции органических веществ в водоеме накапливаются минеральные формы углерода ( $\text{CO}_2$ ), азота ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ), серы ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), фосфора ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), образуются соли азотной, серной и фосфорной кислот.

Органическое вещество в водоеме подвергается деструкции и минерализации не полностью. Часть его удаляется из водоема со стоками в виде растворенного или взвешенного органического вещества, часть теряется в виде газообразных продуктов его распада, а часть органического вещества не подвергается распаду, оседает на дно и входит в состав иловых отложений, где также интенсивно идут микробиологические процессы его минерализации.

К основным микроорганизмам, участвующим в превращениях веществ в водоемах и круговороте биогенных элементов, относятся: фотолитотрофы (пурпурные серобактерии, зеленые серобактерии и несерные пурпурные бактерии) и хемолитотрофы (нитрифицирующие бактерии, серобактерии, водородные бактерии, железобактерии).

Азот- и углеродсодержащие соединения являются основными загрязнителями водоемов, поэтому наши исследования касаются именно тех групп микроорганизмов, которые участвуют в минерализации этих соединений.

Круговорот азота в водоеме обеспечивают микроорганизмы, которые ведут процессы: нитрификации, аммонификации и азотфиксации и обогащают водоем азотом, денитрификация приводит к потере азота водоемом.

Аммонификация – процесс минерализации органического азота (белков тканей отмерших животных, растений и клеток микроорганизмов). Аммонификация протекает в толще воды, но наибольшее количество аммонификаторов имеется в поверхностном слое ила. Из придонных слоев воды аммиак поступает в поверхностные, где подвергается дальнейшим превращениям (нитрификации и денитрификации).

В пресных водоемах наиболее часто встречаются такие аммонификаторы, как *Pseudomonas fluorescens*, *Bacterium agile*, *Micrococcus albidus*, *Bacillus mycoides*, *Bac. oligonitrophilus*, *Bac. subtilis*, *Bac. mesentericus*, *Mycobacterium globiforme* и др. В зависимости от типа водоема в нем преобладают те или иные виды гнилостных микроорганизмов.

Общее количество аммонифицирующих бактерий в пресных водоемах зависит от характера водоема и времени года. Как правило, число бактерий бывает минимальным зимой и максимальным летом в связи с развитием и отмиранием планктона.

Нитрификация – процесс окислительный, поэтому идет только в кислородной зоне. Однако наиболее интенсивная нитрификация наблюдается в поверхностном слое ила и в придонных слоях воды, наименее интенсивная – в поверхностных слоях воды. Это объясняется, во-первых, тем, что из ила постоянно диффундирует аммиак, образующийся при аммонификации и подвергающийся далее окислению при участии нитрифицирующих бактерий и, во-вторых, тем, что эти бактерии обитают преимущественно на твердых субстратах.

Образующиеся в воде нитраты усваиваются фитопланктоном и вновь превращаются в органическую форму азота.

В пресных водоемах наиболее часто встречаются нитрифицирующие бактерии родов *Nitrosomonas*, *Nitrosocystis*, *Nitrosolobus*, *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*.

Благодаря большому разнообразию физиологических групп микроорганизмов обеспечивается разложение практически всех органических веществ до углекислоты и, следовательно, круговорот углерода. При подавлении жизнедеятельности микроорганизмов (при недостатке кислорода, при повышенном давлении в водоеме) начинается накопление полуразрушенных остатков.

Наиболее типичными микробиологическими процессами, протекающими в водоеме, являются аэробный и анаэробный распад полисахаридов – целлюлозы, гемицеллюлозы и пектиновых веществ – самых распространенных углеродсодержащих органических соединений, входящих в состав высших водных растений и фитопланктона.

Наиболее активными из аэробных микроорганизмов, окисляющих целлюлозу, являются плесневые грибы родов *Fusarium*, *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Aspergillus* и др. Основная роль в аэробном распаде целлюлозы принадлежит миксобактериям, относящимся в основном к трем родам – *Cytophaga*, *Sporocytophaga*, *Sorangium*, подробно изученным С.Н. Виноградским, А.А. Имшенецким и др.

Аэробное разложение целлюлозы осуществляют также вибрионы рода *Cellvibrio*, актиномицеты родов *Micromonospora*, *Streptomyces* и др. В анаэробных условиях целлюлоза разлагается бактериями *Clostridium omelianskii* и *Clostridium thermocellum*. Они широко распространены в природе.

Метанооксиляющие бактерии имеют большое значение в круговороте веществ в природе и кислородном режиме водоема. Метанооксиляющие бактерии широко распространены в природных экосистемах и представлены бактериями многих родов – *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, актиномицетами. Метан может окисляться только при наличии в воде растворенного кислорода. Метан образуется в больших количествах в водоемах, но не накапливается, так как окисляется вновь до  $\text{CO}_2$ .

Главная роль в удалении из водоема растворенных веществ принадлежит микроорганизмам, поэтому микробиологические показатели позволяют судить об интенсивности и эффективности самоочищения водоема. В связи с высокими скоростями размножения микроорганизмы являются наиболее чувствительными к изменению состояния водной среды как природного, так и антропогенного характера. Бактерии являются ключевым звеном в биогеохимических процессах водных экосистем, им принадлежит главная роль в самоочищении водоема.

Поступающие в водоемы вещества различного антропогенного происхождения оказывают существенное влияние на сложную экосистему водоема, но в то же время каждый водоем представляет собой экосистему, которая в естественных условиях стремится к самоочищению. Самоочищение водоема – совокупность взаимосвязанных гидродинамических, физико-химических, микробиологических и гидробиологических процессов, ведущих к восстановлению первоначального состояния водного объекта [3]. Поэтому необходимы знания о способности озера к самоочищению, т. е. способности водоема принимать, перерабатывать, удалять вещества природного происхождения и загрязнения.

Необычайно восприимчивы к воздействию и накоплению загрязняющих веществ малые водоемы, находящиеся на урбанизированных территориях. Малые водоемы, находящиеся на территории городов, заслуживают особого внимания, поскольку могут существенно влиять на качество окружающей среды, становиться как местами рекреации, так и зонами экологического бедствия. Однако они пока редко становятся объектами исследований ученых. Поэтому важной задачей является изучение функционирования и устойчивого развития экосистем на урбанизированных территориях. Изучение разнообразных процессов, протекающих в экосистемах, может позволить в будущем устранить противоречия между ростом населения городов и стремлением людей сохранить природу городских ландшафтов.

Понятие «качество воды» подразумевает комплексную оценку, которая включает гидрохимические и гидробиологические характеристики. В настоящее время продолжает использоваться традиционный подход к оценке качества воды, основанный на определении только ряда химических показателей. Это не позволяет в полной мере оценить изменения в водной экосистеме, оценить степень ее нарушенности, выяснить механизм нарушения и дать прогноз дальнейших изменений. В настоящее время системы экологического мониторинга качества поверхностных вод

в США и странах ЕС претерпели существенные изменения в связи с переходом от химического контроля состояния водных объектов к биологическим методам, основанным на биоиндикации, биотестировании и биомониторинге. Объединение химических и биологических методов индикации загрязнения улучшает понимание причин ухудшения качества водной среды.

Наши исследования проведены на оз. Култучное (Камчатка). Озеро Култучное расположено в центре г. Петропавловска-Камчатского и, соответственно, находится на участке жилой и промышленной застроек. Озеро расположено между Мишенной, Никольской и Петровской сопками в центральной части города. Озеро представляет собой эвтрофный водоем с относительно хорошо развитой литоралью, лимнические и профундальные зоны отсутствуют. Вода в озере пресная. Это однослойный водоем, в котором отсутствует слой температурного скачка, значение стратификации незначительно, глубина озера в настоящее время составляет 5–6 метров. Из-за нарушения процессов приливного, штормового и инфильтрационного сообщения с бухтой характерна высокая мутность воды, дно илистое. Уровень воды в озере зарегулирован, благодаря наличию порога

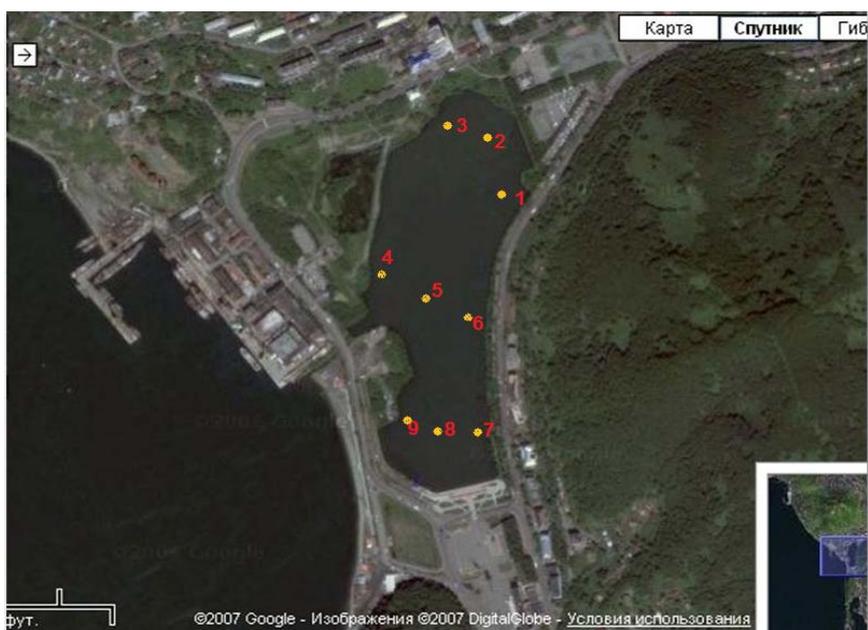
в истоках протоки, соединяющей озеро с бухтой. В исторический для Камчатки период озеро было проточным, в него заходила на нерест рыба (кижуч, голец, корюшка и др.). После 1909 г. с ростом городской инфраструктуры техногенная нагрузка на него стала увеличиваться. В 60-е гг. естественным путем все городские канализационные сети пошли в Култучное озеро, последствия подобного очевидны. Была рекомендована очистка озера, которая так и не была проведена.

В 1990 г. в Култучное озеро были совершены санкционированные сбросы сточных вод нескольких предприятий. В итоге вся озерная вода заменилась городскими стоками и превратилась в органический бульон со слоем антропогенного ила, толщиной в несколько метров. В водоеме не прекращалось гниение органики и процессы, способствующие «цветению» водоема. Естественные родники на дне озера перестали функционировать. Встал вопрос о срочной очистке озера. Контроль над сбросом стоков и очисткой озера взял на себя отдел анализа и мониторинга загрязнения окружающей среды Центра лабораторного анализа и технических измерений Ростехнадзора по Камчатской области. Было решено провести очистку озера путем гидромеханизации с помощью земснаряда. Таким образом, очистка озера состоялась в 1991 г., после чего экологическое состояние его улучшилось. В 1996 г. водолазы специально очищали на дне озера природные роднички. После этого очистку озера не проводили. В настоящее время озеро продолжает загрязняться. Сюда попадают ливневые, аварийные сбросы, сбросы снега со всеми городскими загрязнениями.

Цель наших исследований – оценка химико-экологического состояния воды оз. Култучное по содержанию биогенных, органических веществ и определение роли микроорганизмов в процессах окисления органических соединений и самоочищающей способности водоема.

### Материалы и методы

Для проведения исследований на оз. Култучное были заложены девять станций по периметру и в срединной части озера, схема их расположения показана на рисунке.



Микробиологические и гидрохимические исследования проводились летом и осенью 2007–2008 гг. Пробы отбирались на гидрохимические и микробиологические исследования с

поверхностного и придонного горизонтов. Анализ проводился с применением общепринятых методик и в соответствии с действующими ГОСТ [4–7]. Из химических показателей определяли: величину рН; биогенные элементы (аммонийный, нитритный, нитратный азот); содержание растворенного органического вещества по биохимическому потреблению кислорода (БПК<sub>5</sub>) и перманганатной окисляемости (ПО). Из микробиологических показателей определяли физиологические группы микроорганизмов, осуществляющих превращения азот-, углеродсодержащих органических соединений в воде и иловых отложениях.

Оценка состояния исследуемого водного объекта приведена в таблице в сравнении с нормами предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ для водоемов культурно-бытового пользования и с учетом гигиенических требований к охране поверхностных вод.

Наименование компонента	ПДК
Водородный показатель рН, ед · рН	6,5–8,5
Растворенный кислород (O <sub>2</sub> ) мг/л	Не < 4
Биохимическое потребление кислорода БПК <sub>5</sub>	Не > 6
Аммоний-ион, мг/л	0,5
Нитрит-ион, мг/л	3
Нитрат-ион, мг/л	45

### Результаты исследований

*Величина рН.* Воды озера характеризуются как нейтральные. Значения рН варьируют в интервале 6,8–7,4, что не превышает пределы значений для данной категории водоемов (II категория – водоемы культурно-бытового пользования). *Содержание биогенов.* Аммонийный азот: его содержание в пробах воды колеблется в значительных пределах (от 0,2 мг/л до 8,626 мг/л в поверхностном горизонте вод и от 1,3 мг/л до 9,125 мг/л в придонном горизонте); высокие концентрации аммонийного азота (ПДК 0,5 мг/л) на протяжении всего периода наблюдений указывают на неудовлетворительное санитарное состояние исследуемого водного объекта и на постоянное поступление в него вод, богатых органикой; наиболее высокие значения данного показателя отмечаются в районе расположения сточного коллектора и в зонах отдыха горожан, где расположены предприятия общественного питания. Нитритный азот: его содержание в поверхностном горизонте вод колеблется от 0,002 мг/л до 0,286 мг/л и от 0,003 мг/л до 0,232 мг/л в придонном горизонте; значения, полученные при анализе проб, не превышают допустимых (ПДК 3 мг/л), что указывает на достаточно быстрое окисление нитритов до нитратов нитрифицирующими бактериями. Нитратный азот: его содержание колеблется от исчезающе малых количеств (0,222 мг/л) до концентраций, близких к предельно допустимым (ПДК 45 мг/л) – 42,529–44,650 мг/л, и превышающим ПДК – 56,703–93,619 мг/л. Максимальная концентрация нитратного азота отмечается в осенний период наблюдений, что связано с большим количеством атмосферных осадков в этот период и увеличенным объемом стоков с поверхности почв. Также высокие концентрации нитратного азота в водоеме можно объяснить сбросом частично очищенных и неочищенных бытовых сточных вод, содержащих органические соединения азота (сточный коллектор и места отдыха горожан).

*Растворенный кислород.* Его содержание летом в поверхностном горизонте вод изменялось от 8 мг/л до 13 мг/л, в придонном – от 6 мг/л до 9 мг/л. Осенью концентрация растворенного кислорода в поверхностном горизонте вод составляла – 6–11 мг/л, а в придонном – 4–8 мг/л. В исследуемом нами водоеме наблюдается перенасыщение воды кислородом, вследствие интенсивно протекающего фотосинтеза в летний период (развитие фитопланктона) и поступления кислорода с дождевыми водами, обычно пересыщенными им, в осенний период. БПК<sub>5</sub> и перманганатная окисляемость (ПО): в 2007 г. величина БПК<sub>5</sub> варьировала от 0,5 до 6,5 мг/л, а в 2008 г. отмечена тенденция к увеличению величины БПК<sub>5</sub> с 3,0 до 13,01 мг/л, что свидетельствует

о накоплении биохимически подвижного органического вещества. Наиболее высокие значения этого показателя наблюдаются к концу вегетационного периода (ПДК 3 мг/л). Анализ проб воды показал высокие значения перманганатной окисляемости в летний период (7,5–20,2 мгО/л) и снижение показателей в осенний период наблюдений (3,3–9,8 мгО/л) в результате процессов биохимического окисления с участием микроорганизмов. Причины высоких значений ПО – значительное количество выпавших атмосферных осадков и поступление загрязненных вод ливневой канализации.

Микробиологические исследования показали наличие большого количества микроорганизмов различных физиологических групп, принимающих участие в превращениях соединений азота (аммонификаторы и нитрификаторы I и II фазы) и углерода (целлюлозоразлагающие и углеводородокисляющие бактерии). Из воды оз. Култучное были выделены: аммонификаторы – бактерии родов *Pseudomonas*, *Bacterium*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Mycobacterium*; нитрифицирующие бактерии родов *Nitrosomonas*, *Nitrosocystis*, *Nitrosolobus*, *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*; целлюлозоразлагающие – миксобактерии, относящимся в основном к трем родам – *Cytophaga*, *Sporocytophaga*, *Sorangium*, вибрионы рода *Cellvibrio*, актиномицеты родов *Micromonospora*, *Streptomyces* и бактерии рода *Clostridium*; углеводородокисляющие бактерии представлены бактериями многих родов – *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Arthrobacter*, актиномицетами.

### Заключение

Основываясь на данных ряда химических показателей, исследуемый нами водоем можно отнести к категории «грязный – очень грязный», что связано с постоянным поступлением в него сточных вод, имеющих разнообразный химический состав и различные источники. Обилие в воде оз. Култучное активной микрофлоры различных физиологических групп свидетельствует об участии в процессах разрушения загрязняющих веществ микробных ассоциаций, состоящих из постоянно сменяющихся видов бактерий, ассимилирующих промежуточные продукты превращения азот- и углеродсодержащих соединений. Стабильная окислительная способность микробиоценоза данного водоема указывает на интенсивно идущие процессы бактериального самоочищения водоема. Несмотря на благоприятный кислородный режим и интенсивно протекающие процессы биохимического окисления органических веществ с участием микроорганизмов, антропогенное эвтрофирование водоема продолжается, так как любая экосистема, хотя и увеличивает свою способность к переработке постоянно поступающих загрязняющих веществ, но до определенного предела. Его превышение приводит к деградации и полному разрушению экосистемы. Это значит, что если сегодня не принять соответствующие меры по сохранению экосистемы оз. Култучное, то через 20–25 лет вместо него город будет иметь в самом центре неприглядное дистрофное болото.

### Литература

1. Снакин В.В. Экология и охрана природы (словарь-справочник). – М.: Academia, 2000. – 234 с.
2. Хендерсон-Селлерс Б. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 487 с.
3. Алекин О.А. Общая гидрохимия. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 296 с.
4. Методы гидробиологических исследований: проведение измерений и описание озер. – М.: Экосистема, 1996.
5. Родина А.Г. Методы водной микробиологии. – М.; Л., 1965. – 362 с.
6. Унифицированные методы анализа вод / Под ред. Ю.Ю. Лурье. – М.: Химия, 1971. – 376 с.
7. Bergey's manual of systematic bacteriology: 2<sup>nd</sup> edition. Vol. 1 // Ed. D.R. Boone, R.W. Costenholz: Springer-Verlag N.Y., Berlin, Meidelberg, 2001.