

ВАЛЕНТИНА ПАВЛОВНА МОИСЕЕВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета ПетрГУ
eko200@petrsu.ru

ЕЛЕНА АНАТОЛЬЕВНА МОИСЕЕВА

кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии эколого-биологического факультета ПетрГУ
emoiseeva@mail.ru

НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА КАЛИНКИНА

доктор биологических наук, заведующая лабораторией гидробиологии ИВПС КарНЦ РАН
kalina@nwpi.krc.karelia.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ РЫБ И ВОДНЫХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ К ДЕЙСТВИЮ СТОЧНЫХ ВОД СУЛЬФАТ-ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА В СВЯЗИ С ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ

Рассмотрена реакция различных видов водных организмов на действие сточных вод сульфат-целлюлозных производств. Показано, что сточные воды Сегежского целлюлозно-бумажного комбината вызывали гибель гидробионтов вплоть до разведения в 500–750 раз. Наибольшую устойчивость к токсическому воздействию проявили представители бентоса. Личинки семги, ряпушки, радужной форели и щуки, а также дафнии оказались более чувствительными. Различие в реакции видов связано с их экологическими свойствами, в частности с их отношением к дефициту кислорода в воде. Виды водных животных, чувствительные к дефициту кислорода, менее устойчивы к действию токсических веществ антропогенного происхождения, чем виды, способные к переходу на анаэробный обмен.

Ключевые слова: водные организмы, сточные воды, целлюлозно-бумажная промышленность, толерантность, экологические свойства

К числу крупнейших источников загрязнения водных бассейнов относится целлюлозно-бумажная промышленность. В настоящее время в мире наиболее распространен сульфатный способ получения целлюлозы. В этой связи весьма актуальными становятся работы по изучению влияния сточных вод сульфат-целлюлозных производств на гидробионтов. К настоящему времени накоплены данные о реакции водных организмов различного систематического положения на влияние отходов сульфат-целлюлозного производства. Возникла необходимость обобщения полученных результатов. Одним из подходов может служить рассмотрение реакции гидробионтов на действие сточных вод в связи с отношением видов к дефициту кислорода, постоянно возникающему в водных экосистемах. В. И. Вернадским было высказано предположение о том, что борьба за существова-

ние в гидросфере является в первую очередь борьбой за кислород [1]. В результате в эволюции гидробионтов биохимические адаптации к дефициту кислорода в окружающей среде развились особенно сильно у организмов – обитателей иловых отложений, в значительно меньшей степени – у пелагических видов, живущих в хорошо аэрируемой среде. Устойчивость водных организмов к токсикантам оказалась тесно связанной с их оксифильностью [2]. Именно этот подход и был применен нами для выявления причин различной устойчивости водных организмов к действию отходов ЦБП.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проследить связь между устойчивостью гидробионтов к действию сточных вод ЦБП и их эко-

логическими особенностями, а именно их отношением к дефициту кислорода. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести биотестирование сточных вод с использованием широкого спектра тест-объектов;
- выявить группы гидробионтов, различающихся по устойчивости к действию сточных вод ЦБК;
- провести анализ рядов устойчивости видов в связи с их экологическими особенностями.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве основных методик при биотестировании сточных вод Сегежского ЦБК использовали руководства [3, 4, 5]. Оценка действия сточных вод на зоопланктон давалась по шкале градаций Л. А. Лесникова [6], а определение плодовитости дафний в ряду поколений по методике Н. С. Строганова и Л. В. Колосовой [7]. Эксперименты с рыбами проводились по методике Саратовского отделения ГосНИИОРХа [8]. В работе проанализированы данные регулярного мониторинга сточных вод за период 1979–1988 гг., когда Сегежский комбинат работал по стандартной схеме в стабильном режиме. Кроме того, прослежена ситуация после реконструкции комбината (2003–2004 гг.).

При биотестировании сточных вод Сегежского ЦБК в качестве тест-объектов использовались представители зоопланктона – ветвистые ракообразные *Daphnia magna*, *Daphnia pulex*, бентоса – моллюски *Planorbis sp.*, *Sphaerium corneum*, олигохеты *Tubifex tubifex*, хирономиды *Chironomus dorsalis* и ихтиофауны – радужная форель *Parasalmo mykiss*, ряпушка *Coregonus albula*, семга *Salmo salar* и щука *Esox lucius* на разных стадиях развития (икра и личинки). Дафнии, олигохеты и хирономиды культивировались в лабораторных условиях, моллюски отлавливались в мелких водоемах окрестностей г. Сегежи, икра и личинки рыб доставлялись с рыбозаводов, расположенных на территории Карелии.

Всего за период исследований (1979–1988 гг.) было выполнено более 200 серий опытов на разных видах водных организмов. Для сравнения анализируемых материалов в 2003–2004 гг. отбирались образцы неочищенных сточных вод СЦБК. Исследовались образцы неочищенных сточных вод, которые поступали на станцию биологической очистки тремя потоками: на блок очистки концентрированных стоков (КС) подавались сточные воды дрожжевого производства комбината и сточные воды ДОКа. Отдельным потоком шел основной проток ЦБК. В связи с этим биотестирование неочищенных сточных вод проводилось дифференцированно – отдельно брались проток комбината (обозначенный как блок ЦБК), сток дрожжевого производства гидролизного цеха

(обозначенный как блок КС) и сток деревообрабатывающего комбината (ДОКа).

Полученные данные были обработаны общепринятыми методами вариационной статистики [9]. Достоверность отклонения количественных показателей относительно контроля оценивали по критерию Стьюдента (с 95 % уровнем вероятности). Достоверность отклонения от контроля служила критерием токсичности исследуемых растворов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из трех различных по составу неочищенных сточных вод, поступающих на станцию биологической очистки, максимальной токсичностью обладал поток деревообрабатывающего комбината (ДОКа). В исследовании сточной воды ДОКа наибольшую резистентность показали бентосные организмы (моллюски, хирономиды и олигохеты). Полная или 60–80 %-ая гибель бентосных форм наблюдалась лишь до разведения 1:5. Остальные разбавления (1:10 и более разбавленные) не оказывали отрицательного влияния на метаморфоз хирономид, выживаемость, поведенческие реакции катушек и олигохет. Наибольшую чувствительность к сточной воде ДОКа проявили рыбы на ранних стадиях онтогенеза. Во все годы проведения исследований показатели безвредных разведений сточной воды ДОКа для личинок семги находились в интервале разведений 1:500 – 1:750. Токсический эффект проявлялся вплоть до разбавлений 1:250 и 1:350: на фоне полной выживаемости наблюдалось угнетение активности личинок, потемнение кожных покровов, вес и длина их при окончании эксперимента достоверно ($p < 0.05$) отличались от контроля. Не менее токсичен данный сток и для других видов рыб. Так, разведения тестируемой воды 1:50 – 1:175 для ряпушки на ранних этапах развития оказались летальными, вызывая гибель эмбрионов или личинок. В растворах с разведением 1:250 – 1:350 хотя и произошел массовый выклев, но у личинок была отмечена водянка желточных мешков, снижение двигательной активности, судороги тела. И лишь разбавления сточной воды 1:500 – 1:750 не оказали отрицательного влияния на эмбриональное и раннее постэмбриональное развитие ряпушки. Наибольшую резистентность к тестируемому стоку из изученных видов рыб проявила радужная форель. Сток в разведении 1:350 не оказал отрицательного воздействия ни на эмбрионов, ни на выклюнувшихся личинок радужной форели. Значения недействующих разбавлений сточной воды ДОКа для икры и личинок щуки за период исследований варьировали в пределах от 1:250 до 1:600. Не менее токсичен поток ДОКа и для планктонных организмов, в частности, для *Daphnia magna*. Недействующие разбавления сточной воды для рачков изменялись в пределах от 1:200 до 1:500.

Наиболее резистентными к неочищенной воде дрожжевого производства также оказались бентосные организмы (недействующие разбавления – 1:10 – 1:25). Наибольшую чувствительность к этому стоку проявила *Daphnia magna*. Этот вид сточных вод в разбавлении 1:50 – 1:100 летален для дафний. В более концентрированном растворе рачки прекратили свое существование в I поколении, в 1:100 – в третьем. В разведениях от 1:200 до 1:400 отмечалось увеличение роста и плодовитости, вымет мертвой молоди, что указывало на угнетение состояния дафний. Высокую чувствительность к исследуемой сточной воде проявили и рыбы. Разведения сточной воды 1:50 и 1:100 были остроотоксичными для эмбрионов и личинок всех видов исследованных рыб. В растворах с разбавлением 1:175 большинство выклюнувшихся личинок ряпушки и радужной форели оказались нежизнеспособными, у выживших особей отмечалась слабая пигментация и задержка резорбции желточных мешков. В данном разведении выживаемость мальков семги была высокой, однако линейные размеры рыб достоверно снижались относительно контроля. Выживаемость, поведенческие реакции и морфометрические показатели личинок щуки в этом растворе достоверно не отличались от контроля. Наибольшую чувствительность к неочищенному стоку от дрожжевого производства проявили личинки радужной форели: в растворе с разведением 1:250 у них наблюдалась задержка роста и резорбции желточных мешков, морфометрические показатели при снятии опытов достоверно отличались от контроля. Для личинок ряпушки и семги данная среда была безвредной. В порядке снижения чувствительности всех исследованных рыб можно расположить следующим образом: радужная форель (недействующее разведение – 1:350) – ряпушка, семга (1:250) – щука (1:175).

Из всех проанализированных неочищенных сточных вод наименьшей степенью токсичности обладал основной поток комбината. Исследуемая сточная вода при разбавлении уже 1:10 не влияла на жизнедеятельность катушек, на метаморфоз комаров, но вызывала ускорение роста олигохет, что вновь указывает на высокую устойчивость бентосных форм. Наибольшую чувствительность к нему проявили личинки рыб. Если развитие икры (щука, ряпушка, радужная форель) протекало без видимых отклонений при разведении 1:50 – 1:100, то для выклюнувшихся в опытных растворах личинок эта среда при дальнейшей экспозиции оказалась летальной. Нормальное развитие и рост личинок были возможны только в среде 1:175 (щука, радужная форель), 1:250 (ряпушка). В отдельные годы (1985, 1988) токсичность этой сточной воды для ряпушки была несколько выше – недействующее разбавление находилось в пределах 1:350 – 1:400. Для личинок семги, полученных из икры,

проинкубированной в чистой воде, разбавление сточной воды 1:100 также было токсично. В течение эксперимента в этом растворе погибло 40–50 % подопытных рыб. Среда повлияла и на рост выживших до конца опыта особей: по весу и длине они были достоверно меньше контрольных. На планктонных ракообразных (*D. magna*) данная сточная вода оказывала токсическое влияние вплоть до разбавления 1:50 по показателям состояния воспроизводительной функции. Недействующим пределом для дафний были разведения от 1:100 до 1:200.

Таким образом, неочищенные производственные воды, поступающие на станцию биологической очистки, обладают высокой токсичностью для гидробионтов. По уменьшению токсичности их можно расположить в следующем порядке: сточные воды ДОКа – дрожжевого производства – основной поток комбината. В результате проведенных экспериментов выяснилось, что сточные воды ДОКа и основного потока комбината более опасны для рыб, а воды дрожжевого производства – для кормовых объектов (*D. magna*).

Различные виды водных организмов проявили разную реакцию на действие сточных вод ЦБК. Нами был использован метод главных компонент [10], который позволил провести классификацию водных организмов по их устойчивости к действию сточных вод ЦБП. Была сформирована таблица, содержащая характеристики устойчивости наиболее полно исследованных тест-объектов – хирономид, олигохет, моллюсков *Planorbis sp.*, дафний *Daphnia magna*, личинок ряпушки, радужной форели, семги и щуки. Характеристикой устойчивости видов служили летальные концентрации неочищенных сточных вод, под действием которых смертность организмов достоверно повышалась относительно контроля (табл. 1). Концентрации сточных вод были выражены в процентах. Например, разведение 1:2 соответствовало концентрации 33,3 %.

По результатам компонентного анализа данных были выявлены две компоненты (PC–1 и PC–2), которые отразили основную долю изменчивости признаков – 97 % (табл. 2).

В первую главную компоненту с достоверными положительными факторными нагрузками (более 0,7) вошли все образцы сточных вод за исключением № 17 (деревообрабатывающий комбинат, данные за 1986 г.). Таким образом, первая компонента, отражающая 86 % изменчивости, показывает тесную корреляцию между летальными концентрациями различных образцов неочищенных сточных вод для исследуемых тест-объектов (величины коэффициентов корреляции составили от 0,65 до 0,98). Это означает, что за разные годы водные организмы всегда можно было ранжировать в одну и ту же последовательность по их устойчивости к действию сточных вод. Действительно, если обратиться к табл.1, можно заметить, что для олигохет,

Таблица 1

Летальные концентрации неочищенных сточных вод (%)

Тест-объект	Образцы сточных вод											
	3	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18
Олигохеты	33,3	16,7	9,1	16,7	16,7	9,1	9,1	16,7	9,1	16,7	33,3	33,3
Хирономиды	33,3	16,7	9,1	16,7	16,7	9,1	9,1	16,7	9,1	16,7	9,1	33,3
Моллюски <i>Planorbis sp.</i>	16,7	33,3	16,7	16,7	33,3	9,1	16,7	9,1	9,1	16,7	3,9	16,7
Дафнии	3,9	3,9	1,0	2,0	2,0	1,0	0,5	2,0	0,3	2,0	2,0	0,2
Личинки семги	1,0	2,0	2,0	0,5	1,0	1,0	0,3	1,0	0,6	0,4	0,6	0,2
Личинки форели	2,0	1,0	0,4	1,0	2,0	0,6	1,0	2,0	0,3	0,2	0,6	0,3
Личинки ряпушки	1,0	1,0	0,6	0,4	0,6	1,0	0,3	0,4	0,6	0,2	1,0	0,3
Личинки щуки	9,1	1,0	0,4	0,6	3,9	1,0	1,0	2,0	1,0	0,4	2,0	0,6

Примечание: 3 – общий поток (1981 г.); 7 – дрожжевое производство (1983); 8 – деревообрабатывающий комбинат (1983); 9 – основной проток (1983); 10 – дрожжевое производство (1984); 11 – деревообрабатывающий комбинат (1984); 12 – основной проток (1984); 13 – дрожжевое производство (1985); 14 – деревообрабатывающий комбинат (1985); 15 – основной проток (1985); 17 – деревообрабатывающий комбинат (1986); 18 – основной проток (1987).

хирономид и моллюсков летальные концентрации сточных вод составляют 9–33 %. Для дафний и личинок рыб летальные концентрации неочищенных сточных вод существенно меньше и варьируют в пределах 0,2–9 %.

Исключение составляет сточная вода № 17, которая отражает некоторое отклонение устойчивости моллюсков от ожидаемой. Так, к действию этого образца сточной воды моллюски оказались менее устойчивы, чем это можно было ожидать (летальная концентрация – 3,9 %), в то время как летальные концентрации всех других образцов для него были гораздо больше (9–33 %). Именно это отклонение и определило тот факт, что во вторую главную компоненту максимальный вклад обусловил единственный образец сточных вод № 17 (см. табл. 2).

Расположение тест-объектов в осях первой и второй главной компоненты представлено на рис. 1.

Таблица 2

Факторные нагрузки признаков в две главные компоненты

Признак	Первая компонента	Вторая компонента
3	0,91	0,60
7	0,91	-0,66
8	0,93	-0,59
9	1,00	0,01
10	0,91	-0,65
11	1,00	0,01
12	0,93	-0,57
13	0,93	0,53
14	1,00	0,02
15	1,00	0,01
17	0,67	1,00
18	0,93	0,54
Вклад в общую дисперсию, %	86	11

Как видно, разные тест-объекты четко разделились на два класса, при этом их разделение произошло относительно первой главной компоненты, отражающей различие в устойчивости видов к действию сточных вод. Крайнее правое положение на графике занимают виды: олигохеты, хирономиды и моллюски. Эти виды представляют первый класс – наиболее устойчивых видов к действию сточных вод ЦБК. Крайнее левое положение занимают дафнии и личинки рыб. Эти виды представляют собой второй класс – наименее устойчивые организмы к действию сточных вод.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Объяснить повышенную устойчивость водных организмов из первой группы (олигохеты, хирономиды, моллюски) к сточным водам можно, исходя из их экологических особенностей. Виды беспозвоночных, вошедшие в эту группу, обитают в условиях периодического недостатка кислорода и, как следствие, обладают значительной пластичностью по отношению к дефициту кислорода внешней среды. Существование

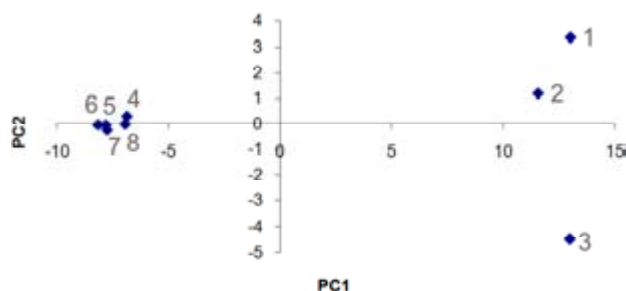


Рис. 1. Расположение тест-объектов в осях первой и второй главной компоненты

Обозначения: 1 – олигохеты; 2 – хирономиды; 3 – моллюски; 4 – дафнии; 5 – личинки семги; 6 – личинки ряпушки; 7 – личинки радужной форели; 8 – личинки щуки.

в течение многих поколений в воде с низким содержанием кислорода привело к развитию у этих животных ряда приспособительных механизмов. Адаптация этих видов к периодически повторяющимся условиям гипоксии привела к сдвигам биохимических процессов в тканях, следствием которых является повышение неспецифической резистентности к различным вредным факторам: не только к недостатку кислорода, эвтрофированию вод, но и к отравлению токсикантами различного происхождения [11, 12]. По-видимому, эти же механизмы послужили основой высокой устойчивости изучаемых нами бентосных форм к действию сточных вод сульфат-целлюлозного производства.

Представители второй группы животных – дафнии и личинки рыб – являются более оксифильными животными по сравнению с исследованными бентосными формами (хиномидами, олигохетами, моллюсками). Дафнии способны выдерживать некоторый дефицит кислорода за счет усиленного синтеза гемоглобина, однако у них недостаточно выражена способность переходить с аэробного на анаэробный тип обмена. Как следствие, у дафний отсутствуют механизмы обезвреживания и выведения ядовитых продуктов промежуточного обмена [13, 11].

По характеру метаболических процессов рыбы занимают определенную ступень филогенетической лестницы между гидробионтами, приспособленными к временному существованию в анаэробных условиях (моллюски, олигохеты, хиномиды), и наземными животными. Уровень гликолитических процессов в их тканях выше, чем у теплокровных животных, и ниже, чем у факультативных анаэробов [14]. В наших исследованиях использовались рыбы – ряпушка, радужная форель, семга, щука, относящиеся к оксифильным видам. Резистентность тканей оксифильных видов рыб к дефициту кислорода весьма мала, что обусловило низкую устойчивость этих видов и к действию токсических

веществ, содержащихся в сточных водах сульфат-целлюлозного производства. Не случайно, по классификации Н. С. Строганова (1971), семга, ряпушка и форель относятся к группе высокочувствительных по отношению к большому числу токсических веществ.

Таким образом, большой эмпирический материал, полученный при биотестировании сточных вод Сегежского ЦБК, подтверждает высказанные ранее гипотезы о том, что более оксифильные виды водных животных менее устойчивы к действию токсических веществ антропогенного происхождения, чем виды, способные к переходу на анаэробный обмен.

ВЫВОДЫ

1. Неочищенные сточные воды сульфат-целлюлозного производства характеризовались различной токсичностью для разных видов водных организмов. Среди потоков сточных вод при раздельном действии на гидробионтов наиболее токсичными оказались сточные воды деревообрабатывающего комбината и дрожжевого производства.
2. Выявлены две группы гидробионтов, различающихся по устойчивости к действию сточных вод сульфат-целлюлозного производства. В первую группу наиболее резистентных видов вошли олигохеты *Tubifex tubifex*, хиномиды *Chironomus dorsalis*, моллюски *Planorbis sp.* Во вторую группу менее резистентных видов вошли дафнии *Daphnia magna*, личинки ряпушки *Coregonus albula* семги *Salmo salar*, радужной форели *Parasalmo mykiss* и щуки *Esox lucius*.
3. Виды гидробионтов, наиболее устойчивые к дефициту кислорода, оказались и более резистентными к действию разнообразных неочищенных сточных вод сульфат-целлюлозного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В. И. Биосфера. М.: Мысль, 1967. 376 с.
2. Брагинский Л. П., Величко И. М., Щербань Э. П. Пресноводный планктон в токсической среде. Киев: Наукова думка, 1987. 180 с.
3. Веселов Е. А. Биологические тесты при санитарно-биологическом изучении водоемов // Жизнь пресных вод СССР. Л.: Изд-во АН ССР, 1959. Т. 4. Ч. 2. С. 7–37.
4. Лукьяненко В. И. Токсикология рыб. М.: Пищевая промышленность, 1967. 216 с.
5. Методические рекомендации по установлению предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ для воды рыбохозяйственных водоемов. М, ВНИРО, 1986. 88 с.
6. Лесников Л. А. Методические указания по установлению предельно допустимых концентраций вредных веществ в воде рыбохозяйственных водоемов. Л.: ГосНИИОРХ, 1973. 22 с.
7. Строганов Н. С., Колосова Л. В. Ведение лабораторной культуры и определение плодовитости дафний в ряде поколений // Методики биологических исследований по водной токсикологии. М.: Наука, 1971. С. 210–216.
8. Горева В. А., Лизина Н. Н., Ельшин Ю. В. Методика постановки опытов при изучении влияния токсикантов на рыб в ранний период онтогенеза // Изв. ГосНИИОРХ. 1976. № 109. С. 115–117.
9. Ивантер Э. В., Коросов А. В. Основы биометрии. Петрозаводск, 1992. 168 с.
10. Коросов А. В. Экологические приложения компонентного анализа. Петрозаводск, 1996. 152 с.
11. Биргер Т. И. Метаболизм водных беспозвоночных в токсической среде. Киев: Наукова думка, 1979. 192 с.
12. Барбашева З. И. Некоторые итоги изучения природы резистентности организма и механизмов ее изменения // Косм. биология и медицина. 1969. № 4. С. 6–12.
13. Збарский Б. И., Иванов И., Мардашев С. Р. Биологическая химия. Л.: Медицина, 1965. 520 с.
14. Маляревская А. Я. Обмен веществ у рыб в условиях антропогенного эвтрофирования водоемов. Киев: Наукова думка, 1979. 256 с.