

АННА СЕРГЕЕВНА ОЛЬКОВА

кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и природопользования Института химии и экологии, Вятский государственный университет (Киров, Российская Федерация)

morgan-abend@mail.ru

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕСТ-ОРГАНИЗМОВ К МИНЕРАЛЬНЫМ ФОРМАМ АЗОТА

Проведено моделирование загрязнения природной воды питьевого качества минеральными формами азота (ионы аммония, нитрат-ионы, нитрит-ионы). Модельные среды тестировались с помощью *Daphnia magna*, *Ceriodaphnia affinis*, *Paramecium caudatum*, тест-системы «Эколюм» для определения рядов чувствительности тест-организмов к азотному загрязнению. Показано, что 5 и 10 ПДК_{р-х} всех исследуемых форм азота не оказывали острого токсического действия на *D. magna*, но достоверно угнетали плодовитость особей спустя 24 дня опыта. В биотесте по угнетению плодовитости *C. affinis* эффект аналогичных доз нитрат- и нитрит-ионов был значительнее: наблюдали снижение показателя до 3,8 раза. Действие ионов аммония в дозах 5 и 10 ПДК для *C. affinis* оказалось летальным. В интервале доз 25–100 ПДК по действующему иону эффекты для низших ракообразных *D. magna* и *C. affinis* были летальными. Для бактерий «Эколюм» 5 и 10 ПДК нитрат- и нитрит-ионов оказывали стимулирующее действие на биолюминесценцию, и только действие ионов аммония значительно угнетало тест-функцию (III группа токсичности). Дальнейшее увеличение тестируемых доз подтвердило, что сила воздействия минеральных форм азота для «Эколюм» возрастала в ряду: $(\text{NO}_2^-) < (\text{NO}_3^-) < (\text{NH}_4^+)$. Реакция инфузорий *P. caudatum* на загрязнение водной среды ионами аммония также оказалась наиболее значительной (II группа токсичности для 5 и 10 ПДК). Построены ряды чувствительности тест-организмов при загрязнении нитрат- и нитрит-ионами: *C. affinis* → *D. magna* → *P. caudatum* → тест-система «Эколюм». При загрязнении ионами аммония соблюдается ряд: *C. affinis* → *D. magna* → тест-система «Эколюм» → *P. caudatum*.

Ключевые слова: биотестирование, *Daphnia magna*, *Ceriodaphnia affinis*, *Paramecium caudatum*, тест-система «Эколюм», загрязнение вод, нитрат-ионы, нитрит-ионы, ионы аммония

ВВЕДЕНИЕ

Минеральные формы азота представлены нитратами, нитритами, ионами аммония. В соответствии с требованиями глобальной системы мониторинга состояния окружающей среды (ГСМОС/GEMS) нитрит- и нитрат-ионы входят в программы обязательных наблюдений за составом питьевой воды и являются важными показателями степени загрязнения и трофического статуса природных водоемов [6].

Наиболее типичными промышленными источниками поступления минеральных форм азота в окружающую среду, в частности поверхностные воды, являются производства минеральных удобрений, а также те предприятия химической промышленности, которые используют азотную кислоту в качестве сырья. Сельское хозяйство как основной потребитель минеральных удобрений в условиях промывного режима является важным антропогенным источником поступления техногенного азота в водные объекты [4].

Авторами [1] на примере озер Ямало-Ненецкого автономного округа показано, что даже водные объекты, не имеющие прямого сброса в них сточных вод, подвергаются закислению из-за

формирования кислотных осадков под влиянием выбросов азота и серы.

В природных поверхностных и сточных водах нередко содержание минерального азота выше установленных нормативов [2]. По этой причине данные соединения наряду с фосфатами являются одними из основных причин эвтрофикации водоемов. При биотестировании природных и сточных вод, загрязненных соединениями азота, могут наблюдаться противоположные друг другу эффекты – как стимуляция, так и угнетение функций организмов, поскольку азот относится к основным биогенным элементам и его эффекты закономерно подвергаются инверсии. Следовательно, установление ответных реакций и рядов информативности тест-организмов может способствовать последующей интерпретации результатов биотестирования.

Целью нашей работы стало установление рядов чувствительности тест-организмов *Daphnia magna* Straus 1820, *Ceriodaphnia affinis* Liljeborg 1900, *Paramecium caudatum* Ehrenberg 1838 и тест-системы «Эколюм» (бактериальный препарат на основе *Escherichia coli* Magula 1895) к загрязнению природных вод нитрат-ионами, нитрит-ионами и ионами аммония в модельных экспериментах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для установления рядов чувствительности моделировалось загрязнение артезианской воды питьевого качества нитратом натрия, нитритом натрия и хлоридом аммония. Данные вещества были выбраны целенаправленно: после диссоциации солей токсический эффект минеральных форм азота будет превалировать над биологическим действием сопутствующих им ионов. Этот факт подтверждается установленными предельно допустимыми концентрациями (ПДК): ПДК_{р-х} нитратов – 40 мг/дм³, для нитритов и ионов аммония нормативы гораздо строже – 0,08 мг/дм³ и 0,5 мг/дм³ соответственно, тогда как допустимое содержание натрия и хлорид-ионов значительно выше (120 мг/дм³ и 350 мг/дм³ соответственно). По причине наличия ПДК_{р-х} в качестве ориентира действующих доз потребности в широком диапазоне тестируемых концентраций не было.

В первой серии экспериментов тестировались относительно невысокие дозы загрязнения, не оказывающие летального действия. Вещества вводились в воду до достижения 5 и 10 ПДК в расчете на действующий ион. Ориентировались на ПДК¹ для водоемов рыбохозяйственного назначения, поскольку дальнейшее тестирование проводили в основном на гидробионтах, а также бактериальной тест-системе «Эколюм». Контрольной средой служила питьевая вода без добавок.

В качестве биотестов были выбраны наиболее распространенные в природоохранных лабораториях методики и соответствующие им тест-организмы. Биотестирование на низших ракообразных *D. magna* и *C. affinis* предполагает определение острой токсичности по показателю гибели особей и хронической токсичности по плодовитости по сравнению с контролем². Дафний в процессе эксперимента ежедневно кормили суспензией водорослей *Scenedesmus quadricauda*, контролировали уровень pH (7,0–8,5 ед. pH) и растворенного кислорода (не менее 6 мг/дм³) контрольной и тестируемых сред. Оптимизация растворов по этим параметрам не требовалась.

В биотесте с использованием *Paramecium caudatum* устанавливают три группы токсичности в

зависимости от степени угнетения хемотаксической реакции инфузорий³. Биотест с использованием бактериальной тест-системы «Эколюм» относится к биолюминесцентным методам: результаты анализа также классифицируются на три группы по величине угнетения биолюминесценции препарата «Эколюм»⁴.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Низшие ракообразные *D. magna* и *C. affinis* различались по чувствительности к тестируемым веществам, наиболее значительно в отношении загрязнения ионами аммония. Для цериодафний запланированные изначально дозы в 5 и 10 ПДК оказались летальными, поэтому в части опыта с внесением в воду ионов (NH₄⁺) для данных организмов концентрации уменьшили до 1 и 2,5 ПДК (табл. 1, 2).

Реакция *D. magna* на загрязнение минеральными формами азота в нелетальных дозах ярче всего отражается на показателе плодовитости. Несмотря на отнесение азота к биогенным элементам, загрязнение его минеральными формами в большинстве случаев угнетало способность рачков к размножению (см. табл. 1). Нитрат-ионы оказывали наименьшее воздействие: доза в 5 ПДК угнетала плодовитость, но различия с контролем оказались недостоверны. На втором месте по силе воздействия оказались нитрит-ионы, снизившие показатель в 2,6 (5 ПДК) и 2,2 (10 ПДК) раза. Максимальное же подавление размножения *D. magna* вызвали добавки ионов аммония.

Кроме смертности и плодовитости *D. magna* за 24 дня эксперимента учитывали количество абортивных яиц и мертворожденной молоди. Эти явления не носили массовый характер, поэтому число фактов приводится в целом на вариант (сумма по трем стаканам). Количество мертвой молоди было единичным во всех вариантах. Без оценки достоверности различий отметим, что максимальное количество абортивных яиц отмечено при воздействии ионами (NH₄⁺).

У цериодафний учитывали только рекомендованные методикой показатели (см. табл. 2).

Таблица 1
Реакции *D. magna* на загрязнение вод нитрат-, нитрит-ионами и ионами аммония

Показатели	Вариант						
	Контроль	Нитрат-ионы (NO ₃ ⁻)		Нитрит-ионы (NO ₂ ⁻)		Ионы аммония (NH ₄ ⁺)	
		5 ПДК	10 ПДК	5 ПДК	10 ПДК	5 ПДК	10 ПДК
Смертность, % к контролю**	0	5	5	7,5	0	2,5	5
Плодовитость, шт./ 1 самку	9,3 ± 0,7	7,3 ± 1,1	5,7 ± 0,1*	3,6 ± 1,1*	4,2 ± 0,1*	2,9 ± 0,5*	2,1 ± 0,2*
Абортивные яйца, шт./вариант	0	5	1	8	6	4	12
Мертворожденные особи, шт./вариант	0	1	4	0	1	1	0

Примечание. * – различия достоверны в сравнении с контролем, ** – погрешность в пределах норматива методики.

Таблица 2

Реакции *C. affinis* на загрязнение вод нитрат-, нитрит-ионами и ионами аммония

Показатели	Вариант						
	Контроль	Нитрат-ионы (NO_3^-)		Нитрит-ионы (NO_2^-)		Ионы аммония (NH_4^+)	
		5 ПДК	10 ПДК	5 ПДК	10 ПДК	2,5 ПДК	1 ПДК
Смертность, % к контролю**	0	10	0	0	0	10	20
Плодовитость, шт./1 самку	25,3 ± 3,4	6,7 ± 2,2*	8,3 ± 3,5*	13,3 ± 5,7*	12,7 ± 5,9*	14,6 ± 4,3*	24,7 ± 8,0

Примечание. * – различия достоверны в сравнении с контролем, ** – погрешность в пределах норматива методики.

Культура *C. affinis* оказалась чувствительнее ко всем формам азота. Про наибольший эффект ионов аммония сказано выше. Сравнивая действие 1 и 2,5 ПДК (NH_4^+), отметим, что, допустимая концентрация действительно не оказывает эффекта по показателю плодовитости, но по смертности взрослых особей достигнут критический предел для опыта на хроническую токсичность – 20 %. Незначительное повышение дозы ионов аммония до 2,5 ПДК привело к снижению размножения в 1,7 раза ($p < 0,05$), но смертность была на уровне случайной – 10 %.

При сравнении действия нитрит-ионов и нитрат-ионов приходим к заключению, что в отличие от *D. magna*, на *C. affinis* больший угнетающий эффект оказывают нитрат-ионы. Плодовитость в ответ на (NO_3^-) снижается в 3,8 (5 ПДК) и 3,1 (10 ПДК) раза, тогда как при воздействии (NO_2^-) примерно в 2 раза (без значимых отличий между дозами).

Анализ вышеизложенных фактов свидетельствует о высокой чувствительности *C. affinis* к минеральным формам азота. В литературе имеются сведения о целесообразности использования *C. affinis* для контроля азотного загрязнения, что объясняется принадлежностью этих рачков к олиготрофным организмам⁵. Другие исследователи рекомендуют комбинировать биотесты на *C. affinis* и *D. magna* в зависимости от сезона года: в весенне-летний период использовать *C. affinis*, в осенне-зимний – *D. magna*, что связано с особенностью реакции этих ракообразных к составу вод, свойственному разным сезонам года [3]. Эту гипотезу в отношении загрязнения вод минеральными формами азота еще предстоит доказать или опровергнуть.

Модельные растворы с добавками нелетальных для низших ракообразных доз далее

тестировались с помощью экспресс-биотестов (табл. 3, 4). Инфузории и бактерии тест-системы «Эколюм» рекомендованы авторами совместно с цериодафиями для биотестирования речных и очищенных вод [5].

Для бактерий «Эколюм» сила воздействия минеральных форм азота возрастала в ряду: (NO_2^-) < (NO_3^-) < (NH_4^+). Причем воздействие нитрат- и нитрит-ионов стимулировало биолюминесценцию бактерий. Такие эффекты крайне сложно интерпретировать при биотестировании нативных сред. Именно поэтому необходимо обращать внимание на ответные реакции нескольких организмов, оперируя фактами о чувствительности каждого из них.

По классификации индексов токсичности для тест-системы «Эколюм» воздействие нитрит- и нитрат-ионов характеризовалось I группой токсичности (пробы нетоксичны), а ионов аммония – III группой токсичности (пробы сильно токсичны).

Как и для других организмов, реакция инфузорий *P. caudatum* на загрязнение водной среды ионами аммония оказалась наиболее значительной (см. табл. 4).

Отличительной особенностью инфузорий стало то, что невысокие дозы нитрат- и нитрит-ионов, нелетальные для низших ракообразных, оказывали на простейших эффект стимуляции их хемотаксиса. Объяснением этому факту является тяготение инфузорий в естественных местообитаниях к водоемам с высоким индексом сапробности⁶. Угнетение тест-функции вызвала добавка соли аммония, но реакция оказалась слабее, чем у бактериальной тест-системы «Эколюм»: по индексам токсичности модельные пробы относятся ко II группе токсичности из

Таблица 3

Ответные реакции бактериальной тест-системы «Эколюм» на минеральные формы азота

Концентрация действующего вещества (ПДК)	Вариант		
	Нитрат-ионы (NO_3^-)	Нитрит-ионы (NO_2^-)	Ионы аммония (NH_4^+)
5	(–2,3) ± 1,1 I группа	(–155,2) ± 8,8 I группа	66,1 ± 1,9 III группа
10	(–15,3) ± 5,7 I группа	(–181,3) ± 10,8 I группа	70,9 ± 2,3 III группа

Таблица 4

Ответные реакции *P. caudatum* на минеральные формы азота

Концентрация действующего вещества (ПДК)	Вариант		
	Нитрат-ионы (NO_3^-)	Нитрит-ионы (NO_2^-)	Ионы аммония (NH_4^+)
5	$(-0,21) \pm 0,08$ I группа	$(-0,16) \pm 0,05$ I группа	$0,44 \pm 0,02$ II группа
10	$(-0,29) \pm 0,03$ I группа	$(-0,11) \pm 0,04$ I группа	$0,53 \pm 0,03$ II группа

Таблица 5

Ответные реакции тест-организмов на дозы минерального азота в интервале от 25 до 100 ПДК по действующему иону

Вариант	Нитрат-ионы (NO_3^-), ПДК			Нитрит-ионы (NO_2^-), ПДК			Ионы аммония (NH_4^+), ПДК		
	25	50	100	25	50	100	25	50	100
Смертность <i>D. magna</i> , %	66,7	100 (5 ч.)	100 (1 ч.)	100 (3 ч.)	100 (0,5 ч.)	100 (0,25 ч.)	100 (2 ч.)	100 (0,25 ч.)	100 (10 мин.)
Смертность <i>C. affinis</i> , %	100 (3 ч.)	100 (1 ч.)	100 (0,25 ч.)	100 (5 ч.)	100 (2 ч.)	100 (1 ч.)	100 (15 мин.)	100 (10 мин.)	100 (5 мин.)
Индекс Т по «Эколюм», у. е.	0 ($-44,5 \pm 8,4$) I группа	0 ($-112,9 \pm 12,8$) I группа	0 ($-113,9 \pm 10,3$) I группа	$7,8 \pm 1,6$ I группа	$8,6 \pm 1,7$ I группа	$13,1 \pm 1,5$ I группа	$60,4 \pm 4,0$ III группа	$69,1 \pm 5,3$ III группа	$60,7 \pm 6,6$ III группа
Индекс Т <i>P. caudatum</i> , у. е.	0 ($-0,35 \pm 0,15$) I группа	$0,15 \pm 0,05$ I группа	$0,34 \pm 0,08$ I группа	0 ($-0,40 \pm 0,1$) I группа	$0,1 \pm 0,02$ I группа	$0,20 \pm 0,05$ I группа	$0,61 \pm 0,1$ II группа	$0,75 \pm 0,09$ III группа	$0,77 \pm 0,2$ III группа

трех возможных – «умеренная степень токсичности».

Дальнейший поиск доз, летальных для низших ракообразных, а также тестирование этих растворов с помощью экспресс-биотестов подтвердили наметившийся ряд чувствительности (табл. 5).

Биотестирование модельных растворов с добавками минеральных форм азота в интервале от 25 до 100 ПДК по действующему иону показало, что для низших ракообразных *D. magna* и *C. affinis* такие дозы являются в большинстве случаев летальными. Только при содержании в воде 25 ПДК нитрат-ионов несколько особей *D. magna* остались живы спустя 96 часов эксперимента. В остальных опытных вариантах варьировало время наступления 100%-й гибели рачков, которое закономерно сокращалось в ответ на увеличение концентрации действующих веществ.

Анализ времени гибели ракообразных с учетом вышеописанных данных подтверждает наибольшую чувствительность *C. affinis* к загрязнению минеральным азотом по сравнению с *D. magna*. Тест-организмы, используемые в экспресс-биотестах, оказались устойчивее к воздействию минеральных форм азота.

Биолюминесценция бактерий возрастала в ответ на увеличивающуюся концентрацию нитрат-ионов. При увеличении добавки нитрат-ионов до 150 и 200 ПДК стимуляция сохранилась. Этот эффект был подтвержден и при моделировании загрязнения дистиллированной воды (в основном эксперименте для всех тест-орга-

низмов использовалась артезианская вода питьевого качества). Отметим, что аналогичные концентрации (NO_3^-) в дистиллированной воде вызывали еще более усиленную стимуляцию биолюминесценции. Например, индекс токсичности Т для варианта 100 ПДК в дистиллированной воде был равен $(-244,6) \pm 27,7$, а в питьевой воде $(-113,9) \pm 10,3$.

По сравнению с бактериальной тест-системой «Эколюм» инфузории оказались чувствительнее к нитрат-ионам. Начиная с дозы в 50 ПДК наблюдался рост положительных индексов Т, свидетельствующий об угнетении хемотаксиса простейших.

Реакция на нитрит-ионы у инфузорий и бактерий «Эколюм» оказалась схожей. Наблюдался закономерный рост индексов токсичности, однако модельные пробы с добавками 25–100 ПДК относились к I группе токсичности. Дальнейшее увеличение тестируемых концентраций до 150 и 200 ПДК закономерно увеличило токсичность до II группы токсичности для «Эколюм» ($24,9 \pm 7,1$ и $26,0 \pm 2,5$ соответственно). В биотесте по хемотаксису инфузорий II группа была достигнута только при 200 ПДК ($0,44 \pm 0,06$).

Максимальное угнетение тест-функций наблюдалось при тестировании растворов с ионами аммония. Основная часть проб была отнесена к III группе токсичности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали, что диагностика загрязнения природных вод минеральными формами азота должна проводиться

с учетом инверсии ответных реакций тест-организмов. Низшие ракообразные выгодно отличаются от экспресс-биотестов возможностью исследования отсроченных эффектов – изменения плодовитости особей, находящихся под воздействием. В случае диагностики техногенного поступления биогенных элементов в окружающую среду такие эффекты проявляются чаще всего. Летальные эффекты, к счастью, для природных вод остаются редкостью благодаря значительному разбавлению сточных и ливневых вод природной составляющей.

В результате двух серий экспериментов, в которых ориентировались, во-первых, на нелетальные дозы для низших ракообразных, во-вторых,

на летальные концентрации для них, удалось построить следующие ряды чувствительности организмов к загрязнению вод минеральными формами азота:

1) при загрязнении нитрат- и нитрит-ионами соблюдается ряд

C. affinis → *D. magna* → *P. caudatum* → тест-система «Эколюм»;

2) при загрязнении ионами аммония следующий ряд чувствительности тест-организмов:

C. affinis → *D. magna* → тест-система «Эколюм» → *P. caudatum*.

Эксперименты будут продолжены для выяснения эффектов совместного действия минеральных форм азота.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ Приказ Росрыболовства от 18.01.2010 № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

² ФР 1.39.2007.03222. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний. М.: Акварос, 2007. 48 с.; ФР 1.39.2007.03221. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости периодафний. М.: Акварос, 2007. 54 с.

³ ФР 1.39.2015.19242. ПНД Ф Т 16.2:2.2-98 (изд. 2015 г.). Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, сточных, талых, технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». СПб.: ООО «СПЕКТР-М», 2015. 21 с.

⁴ ПНДФ Т 14.1:2:3:4.11-04. Т.16.1:2:3:3.8-04. Методика определения интегральной токсичности поверхностных, в том числе морских, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных экстрактов почв, отходов, осадков сточных вод по изменению бактериальной биолюминесценции тест-системой «Эколюм». М.: ООО «Нера-С», 2010. 30 с.

⁵ Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 320 с.

⁶ Там же.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агбалян Е. В., Хорошавин В. Ю., Шинкарук В. Е. Оценка устойчивости озерных экосистем Ямало-Ненецкого автономного округа к кислотным выпадениям // Вестник Тюменского государственного университета. 2015. Т. 1. № 1 (1). С. 45–54.
2. Ашихмина Т. Я., Дабах Е. В., Кантор Г. Я., Лемешко А. П., Скугорева С. Г., Адамович Т. А. Изучение состояния природного комплекса в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Теретическая и прикладная экология. 2010. № 3. С. 18–26.
3. Нефедова С. А., Коровушкин А. А., Минин Д. Г., Зутова Л. Б., Ипатов И. А. К вопросу выбора тест-чувствительных гидробионтов для биотестирования воды в лабораторных производственных и полевых условиях // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 14–20.
4. Соколов О. А., Семенов В. М., Агаев В. А. Нитраты в окружающей среде. Пушкино: Отдел научно-технической информации Научного центра биологических исследований АН СССР, 1990. 316 с.
5. Щеголькова Н. М., Козлов М. Н., Данилович Д. А., Канцерова Т. А. Сравнительная оценка методов биотестирования речных и очищенных вод // Вода и экология: проблемы и решения. 2001. № 2 (7). С. 2–8.
6. Galloway J. N. Acid deposition: perspectives in time and space // Water, Air and Soil Pollut. 1995. Vol. 85. P. 15–24.

Olkova A. S., Vyatka State University (Kirov, Russian Federation)

SENSITIVITY OF TEST-ORGANISMS TO MINERAL NITROGEN FORMS

Modeling of the natural drinking water pollution with mineral forms of nitrogen (ammonium ions, nitrate ions, nitrite ions) was carried out. The modeled waters were tested using *D. magna*, *C. affinis*, *P. caudatum*, the “Ecolum” test system to determine the series of sensitivity of test-organisms to nitrogen contamination. It is shown that 5 and 10 MPC of all nitrogen forms studied did not exert acute toxic effect on *D. magna*, but significantly inhibited the fecundity of individuals after 24 days of the experiment. In the bioassay on the oppression of the fertility of *C. affinis*, the effect of similar doses of nitrate and nitrite ions was more significant: a decrease in the index up to 3,8 times was observed. The effect of ammonium ions at doses of 5 and 10 MPC for *C. affinis* was lethal. In the dose range of 25–100 MPC, the effects for the lower crustaceans *D. magna* and *C. affinis* were lethal according to the

acting ion. For bacteria "Ecolum" 5 and 10 MPC, nitrate and nitrite ions exerted a stimulating effect on the bioluminescence, and only the action of ammonium ions significantly inhibited the test function (group III toxicity). A further increase in the test doses confirmed that the strength of the effect of the mineral forms of nitrogen for "Ecolum" increased in the series: $(\text{NO}_2^-) < (\text{NO}_3^-) < (\text{NH}_4^+)$. The reaction of infusorians of *P. caudatum* to the contamination of the aquatic environment with ammonium ions was also very significant (group II of toxicity for 5 and 10 MPC). The series of sensitivity of test organisms for contamination of nitrate and nitrite by ions are constructed: *C. affinis* → *D. magna* → *P. caudatum* → "Ecolum" test-system. When contaminated with ammonium ions, the following series is observed: *C. affinis* → *D. magna* → Test-system "Ecolum" → *P. caudatum*.

Key words: bioassay, *Daphnia magna*, *Ceriodaphnia affinis*, *Paramecium caudatum*, test-system "Ecolum", water pollution, nitrate ions, nitrite ions, ammonium ions

REFERENCES

1. Agbalyan E. V., Horoshavin V. Yu., Shinkaruk V. E. Estimation of the stability of the lake ecosystems of the Yamal-Nenets Autonomous District to acid deposition [Otsenka ustoychivosti ozernykh ekosistem Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga k kislotnym vypadeniyam]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. Vol. 1. № 1 (1). P. 45–54.
2. Ashihmina T. Ya., Dabah E. V., Kantor G. Ya., Lemeshko A. P., Skugoreva S. G., Adamovich T. A. Study of the state of the natural complex in the zone of influence of the Kirovo-Chepetsk chemical plant [Izucheniye sostoyaniya prirodnogo kompleksa v zone vliyaniya Kirovo-Chepetskogo khimicheskogo kombinata]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2010. № 3. P. 18–26.
3. Nefedova S. A., Korovushkin A. A., Minin D. G., Zutova L. B., Ipatov I. A. On the selection of test-sensitive hydrobionts for biotesting water in laboratory production and field conditions [K voprosu vybora test-chuvstvitel'nykh gidrobiontov dlya biotestirovaniya vody v laboratornykh proizvodstvennykh i polevykh usloviyakh]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2014. № 3. P. 14–20.
4. Sokolov O. A., Semenov V. M., Agaev V. A. *Nitraty v okruzhayushchey srede* [Nitrates in the environment]. Puschino, Otdel nauchno-tekhnicheskoy informatsii Nauchnogo tsentra biologicheskikh issledovaniy AN SSSR Publ., 1990. 316 p.
5. Schegolkova N. M., Kozlov M. N., Danilovich D. A., Kantserova T. A. Comparative assessment of methods for biotesting river and treated waters [Sravnitel'naya otsenka metodov biotestirovaniya rechnykh i ochishchennykh vod]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2001. № 2 (7). P. 2–8.
6. Galloway J. N. Acid deposition: perspectives in time and space. *Water, Air and Soil Pollut.* 1995. Vol. 85. P. 15–24.

Поступила в редакцию 16.05.2017