

ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ПОПУЛЯЦИЙ ГИДРОБИОНТОВ ПРИ НАРУШЕНИИ ИОННОГО СОСТАВА ВОДЫ

© 2002 г. Н. М. Калинин

Институт водных проблем Севера КНЦ РАН
184030 Петрозаводск, просп. А. Невского, 50

Поступила в редакцию 17.01.2000 г.

Исследована зависимость смертности (D) рачков *Eudiaptomus gracilis* Sars от соотношения главных катионов (R , отношение суммы эквивалентных концентраций калия и натрия к сумме эквивалентных концентраций кальция и магния). На основании рассчитанного уравнения регрессии $D = 315 - 355/R$ дан прогноз состояния популяции *E. gracilis* в оз. Поппалиярви (Карелия), которое загрязняется отходами горнорудной промышленности. При величине $R < 0.47$ популяция *E. gracilis* будет выживать, а при значениях $R > 1.53$ следует ожидать ее вымирания. Результаты гидробиологических наблюдений на оз. Поппалиярви подтвердили прогноз, сделанный на основе уравнения.

Ключевые слова: популяция, планктонные ракообразные, пресноводные экосистемы, горнорудное производство, минеральное загрязнение.

Судьба популяций водных организмов в условиях загрязнения водоемов определяется их устойчивостью к данному виду токсиканта, способностью выживать при определенной концентрации вещества. Между концентрацией вещества в воде и реакций организмов существует тесная связь, которая наиболее ярко проявляется в диапазоне эффективных концентраций, т.е. промежуточных между недействующими и абсолютно смертельными. Исследование этой связи можно использовать для решения приоритетной задачи экотоксикологии – прогнозирования состояния природных популяций. При этом достаточно точный прогноз возможен лишь в диапазоне эффективных концентраций токсиканта, т.е. в случае экстремального загрязнения. Количественную форму ему придает построение уравнения зависимости доли погибших организмов от концентрации вещества по данным острых опытов.

Цель настоящего исследования – прогноз состояния популяции рачков *E. gracilis* по соотношению ионов в загрязняемых водоемах. При этом основное внимание мы уделили не величине ионного загрязнения, а соотношению его основных компонентов (калия, натрия, кальция и магния), поскольку для выживания гидробионтов при изменении ионного состава среды наибольшее значение имеют не столько концентрации отдельных катионов, сколько их соотношения (Скадовский, 1955).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Для разработки прогноза были взяты планктонные ракообразные *Eudiaptomus gracilis* Sars (Calanoida), обитающие в водоемах системы

р. Кенти (бассейн р. Кеми, Карелия), и в первую очередь в оз. Поппалиярви (площадь зеркала – 1.7 км², средняя глубина – 4.3 м). Это озеро загрязняется отходами горнорудного производства, вследствие чего в нем нарушился ионный состав воды.

Реакцию природных популяций рачков *E. gracilis* на изменение соотношения катионов определяли с помощью табличного метода (Прозоровский, Прозоровская, 1980), модифицированного для опытов на водных организмах (Калинкина, Коросов, 1995; Калинин, 1999). В экспериментах исследовали реакцию рачков *E. gracilis* на разные соотношения катионов (R) в диапазоне 0.37–2.12. Величину R вычисляли по формуле

$$R = ([K] + [Na]) / ([Ca] + [Mg]),$$

где $[K]$, $[Na]$, $[Ca]$ и $[Mg]$ – эквивалентные концентрации калия, натрия, кальция и магния, выраженные в ммоль/л.

Суммарную концентрацию ионов калия в 11 опытных средах задавали в пределах 13–103 мг/л, для чего к искусственной разбавляющей воде добавляли нитрат калия (для удобства расчетов был принят логарифмический масштаб концентраций ионов калия). В приготовленные растворы помещали половозрелых самок *E. gracilis*, отловленных из чистого оз. Пертозеро (“Поверхностные воды...”, 1991). Долю погибших рачков определяли через сутки.

В опытах использовали искусственную разбавляющую воду. Для ее приготовления в одном литре дистиллированной воды растворяли 58.8 мг хлорида кальция, 24.7 мг сульфата магния, 12.9 мг бикарбоната натрия и 1.2 мг хлорида калия (“Vesitutkimukset”, 1984).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реакция рачков *E. gracilis* на разные соотношения катионов в исследованном диапазоне различалась (табл. 1). В пределах значений R от 0.37 до 1.15 все рачки выжили. Смертность стала возрастать только в диапазоне 1.15–1.71, при еще больших значениях она составила 100%. Отмеченный скачок смертности (D) описывается значимым ($p < 0.002$) уравнением

$$D = a + b/R = 315 - 355/R.$$

С учетом ошибки коэффициенты будут равны: $a = 315 \pm 30$; $b = -355 \pm 41$. Именно это уравнение использовано нами для прогноза выживаемости природных популяций в условиях минерального загрязнения.

В районе исследования минеральное загрязнение началось в 1982 г. после запуска горнорудного комбината, техногенные воды которого стали поступать в водоемы системы р. Кенти. Общая минерализация техногенных вод составляет 460 мг/л ("Современное состояние...", 1998). Главным компонентом техногенных вод является калий, концентрация которого достигает 125 мг/л. Содержание натрия составляет 15 мг/л, кальция – 20 мг/л, магния – 11 мг/л. Концентрации тяжелых металлов в техногенных водах невелики, что объясняется щелочной реакцией среды (рН 8.3), препятствующей миграции тяжелых металлов из твердых фракций отходов в водную среду.

Динамика поступления минеральных веществ в водоемы системы р. Кенти, включая изучаемое оз. Поппалиярви, менялась по годам от 2 (1992–1993 гг.) до 9–22 (1994–1999 гг.) млн. м³ техногенных вод. Одновременно наблюдалось непропорциональное увеличение концентраций калия, натрия, кальция и магния, что привело к изменению соотношения катионов в озере от 0.47 до 1.09 (табл. 2).

Используя данные по минеральному загрязнению, мы предприняли попытку дать прогноз реакции популяций рачков, обитающих в оз. Поппалиярви. Для этого с помощью приведенного выше уравнения вычисляли значения смертности рачков при разных величинах соотношения катионов (см. табл. 2) (отрицательные прогнозные

значения смертности приравнивали к нулю, превышающие 100 – к 100%). Поскольку лабораторные эксперименты длились одни сутки, расчетные значения смертности соответствуют суточной смертности рачков и поэтому могут сравниваться со значениями суточной смертности рачков в природе (сут⁻¹) (Иванова, 1985). Если при таком сравнении оказывалось, что расчетная смертность при заданном значении R принимала нулевые значения или была ниже показателей для природных популяций, считали, что в этом случае действие фактора минерального загрязнения отсутствует, и численность популяции в водоеме находится в пределах естественных колебаний. Если же расчетная смертность превышала показатели для природных популяций, то мы прогнозировали снижение численности популяции рачков при данном уровне R . Помимо средних значений смертности, при данном соотношении ионов рассчитывали теоретические границы варьирования смертности ($D \pm 2m$), которые позволяют более детально оценить картину вымирания популяции.

Последствия постепенного загрязнения водоемов р. Кенти во многом напоминали лабораторный эксперимент. В первые годы (до 1992 г. включительно) загрязнение было не сильным, наш прогноз по уравнению давал нулевые смертности и численность *E. gracilis*, соизмеримую с другими водоемами системы р. Кенти (см. табл. 2). Прогноз смертности рачков в 1993 г. также был позитивным, хотя в водоеме наблюдаются первые признаки неблагополучия: начинается снижение доли рачков в сообществе зоопланктона; численность рачков также понижена, но в пределах естественных колебаний.

Для следующего 1994 г., когда минерализация в озере существенно возросла, наши расчеты по уравнению показывают начало вымирания популяции *E. gracilis*; в худшем случае оно может достичь 34%. В действительности же, хотя доля вида в зооценозе уменьшилась, численность рачков все еще находилась в диапазоне нормальной изменчивости. На наш взгляд, при разрешении этого противоречия речь должна идти не об ошибке прогноза, а об акклимации (индивидуальной, физиологической адаптации) животных в условиях

Таблица 1. Смертность *E. gracilis* в растворах с различным соотношением главных катионов

Показатель	Номер раствора										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Концентрация калия, мг/л	13	16	19	23	28	35	43	53	66	82	103
Соотношение катионов, R	0.37	0.42	0.48	0.56	0.66	0.79	0.95	1.15	1.40	1.71	2.12
Смертность D^* , %	0	0	0	0	0	0	0	0	75	100	100

* Значения смертности усреднены по двум повторностям.

Таблица 2. Некоторые показатели ионного состава воды, прогнозные значения смертности и численность популяции *E. gracilis* в оз. Поппаллярви в 1992–1999 гг.

Показатель	Год наблюдений					
	1992	1993	1994	1995	1996	1999
Общая минерализация, мг/л:	63	97	182	222	184	260
K	6	11	42	60	45	58
Na	2	2	6	6	5	7
Ca	6	11	15	14	13	20
Mg	3	4	6	6	6	8
Соотношение катионов <i>R</i>	0.47	0.40	1.10	1.53	1.21	1.08
Нижняя граница доверительного интервала* прогнозной смертности <i>D'</i> , %	0	0	0	67	4	0
Прогнозная средняя смертность <i>D'</i> , %	0	0	0	83	22	0
Верхняя граница доверительного интервала прогнозной смертности <i>D'</i> , %	0	0	17	99	39	13
Численность <i>E. gracilis</i> ** , тыс. экз./м ³	7.44	1.69	2.02	0.01	0.43	0
Доля <i>E. gracilis</i> в общей численности зоопланктона, %	60	36	22	5	2	0

* Границы доверительного интервала даны для уровня значимости 95%.

** Численность *E. gracilis* и доля в общей численности зоопланктона в оз. Поппаллярви в 1992–1996 гг. ("Современное состояние...", 1998).

умеренного загрязнения. Явление акклимации к сублетальным концентрациям калия мы исследовали в лабораторных экспериментах на двух поколениях ветвистоусых ракообразных *Simocephalus serrulatus* Koch (Калинкина, Пименова, 1999). Продолжительная жизнь в растворе с концентрацией калия 60 мг/л вызвала у рачков повышение индивидуальной устойчивости (среднесмертельная концентрация калия) в два раза и рост плодовитости в три раза. Видимо, сходные компенсации позволили рачку *E. gracilis* сохранить нормальный уровень численности и в 1994 г.

При дальнейшем росте уровня загрязнения в 1995 г. наша модель предписывает вымирание существенной (до 100%) части популяции. И действительно, численность вида в оз. Поппаллярви снижается до 10 экз./м³, а доля – до 5%. Для 1996 г. прогноз состояния популяций рачков почти столь же неблагоприятен, что и в 1995 г., что в целом подтверждается натурными наблюдениями.

В последующие три года интенсивность сброса техногенных вод увеличивалась. В результате к 1999 г. уровень общей минерализации воды в оз. Поппаллярви возрос, хотя соотношение основных катионов изменилось в лучшую сторону. В этой ситуации наш прогноз предписывает постоянную, хотя и не очень значительную, смертность рачков. Однако, судя по наблюдениям в природе, за три года сильного антропогенного пресса популяция *E. gracilis* в оз. Поппаллярви практически полностью вымерла (Кухарев и др., 1998; Хазов и др., 1999). Иначе, в терминах токсикометрии, острое

воздействие сменилось хроническим к моменту гибели всех тест-объектов.

Таким образом, мы установили сходство критических значений соотношения катионов для лабораторной культуры и природной популяции *E. gracilis*. Использованная нами величина *R* (отношение суммы эквивалентных концентраций калия и натрия к сумме эквивалентных концентраций кальция и магния) оказалась чувствительным индикатором благополучия природных популяций: превышение уровня *R* = 1.5 закономерно ведет к вымиранию природных популяций *E. gracilis*.

Подобные же закономерности изучены для многих пресноводных и морских животных в отношении солёности (Хлебович, 1974). Более того, определенные в экспериментах границы толерантности животных к минеральному фактору совпадают с экологическими границами распространения видов в условиях разнородной солёности и концентраций отдельных катионов (Березина, 1999).

Это позволяет предполагать, что и величина *R* = 1.5 может служить не только критерием вымирания популяций *E. gracilis* в условиях экстремального загрязнения водоемов, но и фактором, определяющим границы ареала вида. При этом на фоне достаточно широкого варьирования концентраций изученных компонентов среды наибольшую чувствительность рачки проявили в отношении постоянства соотношения между компонентами. Дисбаланс между изученными ионами в среде обитания отражался на судьбе особей и по-

пуляций более существенно, чем изменение концентрации каждого из этих компонентов в отдельности.

Автор выражает благодарность сотрудникам Института водных проблем Севера КНЦ РАН А.К. Морозову и Л.И. Власовой, которые любезно предоставили данные по химическому составу воды оз. Поппалиярви в 1992–1999 г. и состоянию зоопланктона оз. Поппалиярви в 1999 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Березина Н.А.* Толерантность *Omisus caledonicus* (Diptera: Chironomidae) к изменению солености, pH и ионного состава воды // *Экология*. 1999. № 1. С. 67–69.
- Иванова М.Б.* Продукция планктонных ракообразных в пресных водах. Л.: ЗИН АН СССР, 1985. 222 с.
- Калинкина Н.М.* Два метода биотестирования сточных вод // *Экологические исследования природных вод Карелии*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. С. 83–87.
- Калинкина Н.М., Коросов А.В.* Исследование химической толерантности гидробионтов в полевых условиях методами водной токсикологии // *Контроль состояния и регуляции функций биосистем*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1995. С. 93–97.
- Калинкина Н.М., Пименова И.В.* Акклимация гидробионтов из водоемов системы р. Кенти к повышенным концентрациям калия // *Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии*. Тез. докл. Международн. конф. и выездной научной сессии Отделения общей биологии РАН. Петрозаводск, 1999. С. 129.
- Кухарев В.И., Калинкина Н.М., Дубровина Л.В. и др.* Комплексная оценка эколого-техногенной нагрузки (Костомукшский ГОК) на водные системы (р. Кенти) // *Инженерная экология*. 1998. № 6. С. 33–41.
- Поверхностные воды озерно-речной системы Шуи в условиях антропогенного воздействия. Петрозаводск: Карельский научный центр АН СССР, 1991. 212 с.
- Прозоровский В.Б., Прозоровская М.П.* Табличный метод определения ЕД50 (LD50) веществ с низкой биологической активностью // *Фармакология и токсикология*. 1980. № 6. С. 733–735.
- Скадовский С.Н.* Экологическая физиология водных организмов. М.: Сов. наука, 1955. 338 с.
- Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1998. 112 с.
- Хазов А.Р., Калинкина Н.М., Власова Л.И.* Стабильность сообществ гидробионтов и оценка их биологического разнообразия в условиях минерального загрязнения водоемов северо-запада Карелии // *Экология*. 1999. № 5. С. 373–374.
- Хлебович В.В.* Критическая соленость биологических процессов. Л.: Наука, 1974. 236 с.
- Vesitutkimukset. Akuutin myrkyllisyyden maaritys Daphnia magna* Straus vesikirpulla. Suomen standartisoisliitto. SFS 5062. Helsinki, 1984. 9 s.