

УДК 574.52.017.3:574.2:546.32

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕЗИСТЕНТНОСТИ *Simocephalus serrulatus* Koch ПРИ АККЛИМАЦИИ К ПОВЫШЕННЫМ КОНЦЕНТРАЦИЯМ ИОНОВ КАЛИЯ

© 2002 г. Н. М. Калинин*, И. В. Пименова**

* Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН,
185030 Республика Карелия, Петрозаводск, пр. А. Невского, д. 50

** Петрозаводский государственный университет,
185640 Республика Карелия, Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33

Поступила в редакцию 15.02.2001 г.

Исследована реакция гидробионтов на действие ионов калия – основного компонента отходов горно-рудного производства, загрязняющего водоемы Карелии. В длительных экспериментах на двух поколениях *Simocephalus serrulatus* Koch (Crustacea, Cladocera) обнаружено, что рачки способны адаптироваться к повышенным концентрациям калия: увеличивается их резистентность к калию и возрастает плодовитость. В загрязняемых водоемах ракообразные выживают до тех пор, пока концентрация токсиканта (калия) не превысит некоторый порог, который для ряда фоновых видов зоопланктона составляет 60 мг/л.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение резистентности организмов к действию какого-либо фактора представляет собой следствие их адаптации к измененным условиям среды [7]. Подробно исследованы, например, случаи изменения резистентности различных видов ракообразных к солености [6]. При этом диапазон факторов среды, в пределах которого изучено адаптивное увеличение резистентности, как правило, определяется границами этих факторов, наблюдаемыми в природе. В то же время значительно реже изучаются адаптационные возможности организмов к новым уровням факторов, обусловленным антропогенным вмешательством и ранее в природе не наблюдавшимся.

В работе изучена реакция гидробионтов на действие ионов калия – основного компонента отходов горно-обогатительного комбината, расположенного на северо-западе Республики Карелия. Предварительные исследования показали, что в водоемах озерно-речной системы р. Кенти, загрязняемых техногенными водами комбината, общая минерализация (60–450 мг/л) и содержание ионов калия (10–100 мг/л) достигли экстремально высоких значений, в то время как фоновые концентрации этих показателей для водоемов данного региона весьма малы (14–16 и 0.3–0.4 мг/л соответственно) [5]. В сообществах зоопланктона и зообентоса загрязняемых озер происходит замещение северных стенобионтных видов более устойчивыми к повышенной минерализации эврибионтными видами. При этом в сообществах гидробионтов наблюдаются признаки стабилизации [3], одной из причин которой может быть, например, адаптивное увеличение резистентности водных организмов к загрязняющим веществам.

Однако данный вопрос в отношении калия (как основного компонента загрязнения) до сих пор не изучался.

Целью работы стало изучение устойчивости и плодовитости *Simocephalus serrulatus* Koch (Crustacea, Cladocera) при действии повышенных концентраций калия. Исследовали хроническое действие калия на рачков в экспериментальных условиях, резистентность и плодовитость *S. serrulatus*, адаптированных к различным концентрациям калия.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты ставили на партеногенетически размножающихся самках *Simocephalus serrulatus* Koch, лабораторная культура которых поддерживается в течение семи лет. Эксперимент состоял из двух последовательных этапов. На первом этапе исследовали хроническое действие растворов нитрата калия на рачков. Для этого было сформировано пять групп по 100 экз. двухдневных рачков в каждой. Животных размещали в исследуемые среды: водопроводную отстоянную воду, которая служила контрольным вариантом (первая группа), в растворы нитрата калия с концентрациями в пересчете на ионы калия: 10 мг/л (вторая группа), 20 мг/л (третья), 50 мг/л (четвертая) и 60 мг/л (пятая группа). Все опыты ставили в 10 повторностях по 10 экз. рачков в каждой. Объем среды для каждого 10 рачков составил 100 мл. Корм (зеленые водоросли *Scenedesmus quadricauda*) давали в избытке. Смену растворов на свежие производили через 1 сут.

На 15-е сут эксперимента из каждого сосуда отсаживали молодь для следующего (первого) поколения рачков. Молодых рачков из контроля

Таблица 1. Условия эксперимента по определению среднесмертельной концентрации калия для рачков *Simocephalus serrulatus*

| Поколение | Номер группы | Исследованные концентрации калия, мг/л | N |
|-----------|--------------|--|----|
| Исходное | 1 | 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 | 10 |
| | 2 | 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 | 10 |
| | 3 | 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 | 10 |
| | 4 | 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 | 10 |
| | 5 | 100, 110, 120, 130, 140 | 6 |
| Первое | 1 | 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 | 10 |
| | 2 | 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 | 10 |
| | 3 | 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 | 10 |
| | 4 | 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 | 10 |
| | 5 | 90, 100, 110, 120, 130, 150 | 10 |

Примечание. N – количество животных в выборке, на которой исследовано действие каждой концентрации.

помещали в контрольные среды, а из растворов нитрата калия с различными концентрациями – в соответствующие же растворы этой соли (по 100 экз. в каждой группе). Продолжительность опытов с исходным поколением составила 15 сут, с первым поколением – 21 сут. Температура воды варьировала в пределах 16.5–18°C (исходное поколение), 18–20°C (первое поколение).

В экспериментах на двух последовательных поколениях ежедневно регистрировали число выживших рачков. С момента их созревания просчитывали и удаляли нарождавшуюся молодежь. Среднюю взвешенную плодовитость e_1 (экз. на 1 самку в 1 сут) рассчитывали по формуле

$$e_1 = E_1/N_1, \quad (1)$$

где E_1 – суммарное число молодых рачков, появившихся за репродуктивный период, N_1 – суммарное число выживших взрослых рачков за репродуктивный период. Эта оценка позволяет учесть фактор смертности взрослых животных и рассчитать плодовитость только для выживших самок.

Еще один способ оценить плодовитость за весь период наблюдения состоит в определении динамики увеличения общего числа потомков животных из опыта (вычисление кумуляты плодовитости). Эта величина дает более наглядное представление о репродуктивном потенциале лабораторной популяции. Рассчитывали кумуляту плодовитости, последовательно суммируя среднюю плодовитость e_2 (экз. на 1 самку в 1 сут) в различные сутки эксперимента. Среднюю плодовитость e_2 определяли по формуле:

$$e_2 = E_2/N_2, \quad (2)$$

где E_2 – суммарное число молодых рачков, появившихся в данные сутки эксперимента, N_2 – суммарное число выживших взрослых рачков за данные сутки эксперимента.

На втором этапе изучали результат акклиматизации рачков исходного и первого поколений, выживших к концу опыта (на 15-е и 21-е сут соответственно), к разным концентрациям калия. Рачков в каждой группе объединяли из всех повторностей в одну выборку. Получено по пять выборок для каждого поколения. Животных рассаживали в растворы калия с концентрациями от 55 до 150 мг/л. При этом для разных групп животных диапазон концентраций варьировал. Например, для животных из первой и второй групп (исходное поколение) диапазон концентраций калия составил 55–85 мг/л, для рачков из третьей группы (исходное поколение) – 66–120 мг/л и т.д. (табл. 1). В каждый раствор помещали по 6–10 экз. животных и через 1 сут регистрировали их смертность. По результатам опыта определяли среднесмертельную концентрацию (CL_{50}) ионов калия для каждой группы методом пробит-анализа. Ошибку CL_{50} определяли методом Миллера – Тейтнера [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отрицательное действие калия на рачков исходного поколения проявилось в первые сутки эксперимента: начиная с 4–9 сут и в последующие сутки отмечали гибель животных во всех исследованных растворах. При этом наименьшая выживаемость рачков отмечалась в растворах с концентрацией калия 60 мг/л (табл. 2).

Потомство рачков, полученное в течение опыта в растворах калия, оказалось более устойчивым. Так, в растворах с концентрацией калия 10 мг/л выживаемость рачков была достоверно выше, чем в контроле, с концентрацией 20 мг/л – выживаемость была близка к контрольному показателю, а при концентрациях 50 и 60 мг/л погибла лишь незначительная часть животных.

Наибольший интерес представляют данные опытов о влиянии калия на репродуктивную функцию рачков. Плодовитость исходного поколения при концентрации 10 мг/л была достоверно выше, чем в контроле, а при концентрациях 20, 50 и 60 мг/л плодовитость достоверно не отличалась от контрольной (табл. 2).

Плодовитость следующего (первого) поколения, выращенного в растворах с концентрациями 10 и 20 мг/л, была близка к контрольной, в то время как в растворах калия с концентрациями 50 и 60 мг/л плодовитость возрастала. Достоверное ($p < 0.05$) увеличение плодовитости относительно контрольных показателей определено для рачков из растворов с концентрацией 60 мг/л.

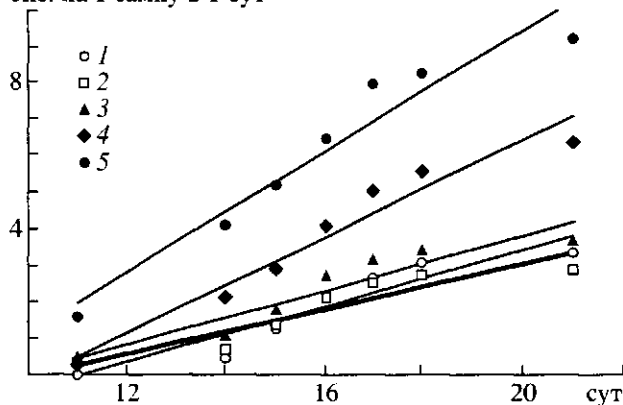
Рассчитаны линии кумуляты средней плодовитости рачков первого поколения из контроля и растворов с концентрациями калия 10, 20, 50 и 60 мг/л.

Растворы калия с концентрациями 10 и 20 мг/л не проявили своего влияния на плодовитость рачков в течение всего эксперимента (см. рисунок). В то же время растворы с высокими концентрациями калия (50 и 60 мг/л) вызывали рост плодовитости с первых же суток созревания рачков. При этом в растворах калия отмечался более массовый вымет молоди: на 11-е сут опыта молодь появилась уже во всех сосудах с растворами калия, в то время как в контрольной среде – лишь в половине сосудов. В дальнейшем различия в средней плодовитости усиливались за счет большего числа молоди в пометах рачков из растворов калия.

Таким образом, два поколения рачков продемонстрировали диаметрально противоположную реакцию на действие ионов калия. Это связано, по-видимому, с разными условиями опыта для двух поколений. Рачки исходного поколения были помещены в растворы калия в возрасте 2 сут, в то время как все стадии формирования их потомства (в том числе, ово- и эмбриогенез) проходили в растворах токсиканта. Очевидно, что влияние калия в концентрациях 50 и 60 мг/л именно на ранние стадии развития организмов и определило возрастание плодовитости рачков первого поколения.

Результаты второго этапа эксперимента представляли собой кривые смертности, полученные при исследовании острого действия растворов калия в концентрациях 55–150 мг/л на рачков исходного и первого поколений, адаптированных к разным концентрациям калия. Статистическое сравнение резистентности рачков из различных групп проводили с использованием наиболее точного токсикометрического параметра – среднесмертельной концентрации ионов калия, определяемой на основе пробит-анализа кривых смертности. Для контрольных рачков исходного и первого поколений величина CL_{50} составила 64–69 мг/л (табл. 3). Для рачков, акклимированных к различным концентрациям калия, все искомые величины

экз. на 1 самку в 1 сут



Кумулята плодовитости рачков первого поколения: 1 – контроль; 2–5 – концентрации калия 10, 20, 50 и 60 мг/л соответственно.

CL_{50} были значимо ($p < 0.001$) выше, чем значения этого параметра для контрольных рачков.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявлена адаптация *Simocephalus serrulatus* к повышенным концентрациям калия. Одним из признаков адаптации оказалось увеличение резистентности животных, выращенных в растворах с разными концентрациями калия (10–60 мг/л). Другое проявление адаптации – повышение плодовитости рачков, все стадии формирования которых, начиная с ово- и эмбриогенеза, прошли в растворах калия с концентрациями 50 и 60 мг/л.

Способность адаптироваться к повышенным концентрациям калия установлена и для других видов ракообразных, например, *Daphnia magna* Straus [1] и *Sida crystallina* O.F. Müller [2].

Можно предположить, что в условиях загрязнения водоемов повышенные резистентность и плодовитость будут способствовать воспроизводству популяций ракообразных, компенсируя воз-

Таблица 2. Выживаемость и плодовитость исходного и первого поколений рачков *Simocephalus serrulatus* при различных концентрациях калия

| Поколение | Концентрация калия, мг/л | Выживаемость к концу опыта, % | | Средняя плодовитость, экз. на 1 самку в 1 сут | |
|-----------|--------------------------|-------------------------------|-------------|---|-------------|
| | | максимальная | минимальная | максимальная | минимальная |
| Исходное | Контроль | 98 | 1 | 0.49 | 0.04 |
| | 10 | 84* | 3 | 0.65* | 0.07 |
| | 20 | 83* | 4 | 0.52 | 0.06 |
| | 50 | 75* | 6 | 0.51 | 0.07 |
| | 60 | 50* | 9 | 0.35 | 0.11 |
| Первое | Контроль | 81 | 7 | 0.41 | 0.03 |
| | 10 | 96* | 2 | 0.37 | 0.04 |
| | 20 | 89 | 3 | 0.47 | 0.08 |
| | 50 | 66 | 7 | 1.02 | 0.31 |
| | 60 | 68 | 8 | 1.30* | 0.19 |

* Отличие от показателей для рачков из контроля достоверно ($p < 0.05$).

Таблица 3. Среднесмертельные концентрации калия для рачков *Simocephalus serrulatus* из разных групп

| Поколение | Номер группы | Среднесмертельная концентрация, мг/л | |
|-----------|--------------|--------------------------------------|-------------|
| | | максимальная | минимальная |
| Исходное | 1 | 64 | 2 |
| | 2 | 87* | 3 |
| | 3 | 107* | 3 |
| | 4 | 111* | 4 |
| | 5 | 132* | 4 |
| Первое | 1 | 70 | 2 |
| | 2 | 93* | 4 |
| | 3 | 110* | 3 |
| | 4 | 112* | 3 |
| | 5 | 125* | 6 |

* Отличие от среднесмертельной концентрации для рачков из первой группы достоверно ($p < 0.001$).

можную высокую смертность, вызванную действием повышенных концентраций калия. При этом популяции ракообразных будут сопротивляться повреждающему действию повышенных концентраций калия до некоторого порога загрязнения. Например, популяция *Eudiaptomus gracilis* Sars в оз. Поппалиярви (система р. Кенти, Карелия) вымерла, когда концентрация калия достигла 60 мг/л [5]. По-видимому, адаптационные возможности *E. gracilis* исчерпываются при этой концентрации калия.

Выводы. Обнаружена фенотипическая адаптация (увеличение резистентности и возрастание плодовитости) рачков *Simocephalus serrulatus* к

повышенным концентрациям калия в условиях хронического эксперимента. Резистентность рачков зависит от качества среды обитания: чем выше концентрация калия (10–60 мг/л), при которой живут рачки, тем большую устойчивость к токсиканту они приобретают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данильченко О.П., Исакова Е.Ф., Ильичева Т.В., Строганов Н.С. Об экологической вредности химических соединений // Теоретические проблемы водной токсикологии. Норма и патология. М.: Наука, 1983. С. 167–180.
2. 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 Финноскандии: Тез. докл. международ. конф. и выездной научной сессии Отд. общ. биол. РАН. Петрозаводск, 1999. С. 129.
3. 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.
4. Прозоровский В.Б. Использование метода наименьших квадратов для пробит-анализа кривых летальности // Фармакология и токсикология. 1962. № 1. С. 115–119.
5. Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1998. 112 с.
6. Хлебович В.В. Акклимация животных организмов. Л.: Наука, 1981. 136 с.
7. Хлебович В.В., Бергер В.Я. Некоторые аспекты изучения фенотипических адаптаций // Журн. общ. биол. 1975. № 1. С. 11–25.

The Increase of *Simocephalus serrulatus* Koch Tolerance under Effect of Increased Potassium Ions Concentrations

N. M. Kalinkina*, I. V. Pimenova**

* Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Russia

** Petrozavodsk State University, Russia

The response of aquatic organisms to the effect of potassium ions (the main component of mining wastes discharged into water bodies of Karelia) was studied. Long-term experiments on the two generations of *Simocephalus serrulatus* Koch (Crustacea, Cladocera) have shown the ability of crustaceans to adapt to increased potassium concentrations. Their tolerance to potassium and fertility increase. The crustaceans survive in polluted waterbodies until the potassium concentration reaches a certain threshold which amounts to 60 mg/l.

Сдано в набор 27.06.2002 г.
Офсетная печать

Подписано к печати 23.08.2002 г.
Усл. печ. л. 12,0
Тираж 263 экз.

Формат бумаги 60 × 88¹/₈
Уч.-изд. л. 12,1
Бум. л. 6,0

Свидетельство о регистрации № 013359 от 22.02.95 г.
в Министерстве печати и информации Российской Федерации
Учредители: Росийская академия наук, Институт биологии внутренних вод РАН

Адрес издателя: 117997, Москва, Профсоюзная, ул., 90
Отпечатано в ППП "Типография "Наука", 121099 Москва, Шубинский пер., 6