

DOI 10.31029/vestdnc95/5

УДК 574.583:574.23:574.64

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛЕЙ НАТРИЯ НА ГИДРОБИОНТЫ НА ПРИМЕРЕ НЕКОТОРЫХ ВОДОТОКОВ

А. Г. Тригуб¹, ORCID: 0000-0002-6710-6278

М. В. Медянкина¹, ORCID: 0000-0002-9195-0399

Т. В. Дрозденко², ORCID: 0000-0002-5553-2296

¹Московский государственный университет технологий и управления
им. К.Г. Разумовского, Москва, Россия

²Псковский государственный университет, Псков, Россия

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE EFFECT OF SODIUM SALTS ON AQUATIC ORGANISMS ON THE EXAMPLE OF SOME WATERCOURSES

A.G. Trigub¹, ORCID: 0000-0002-6710-6278

M. V. Medyankina¹, ORCID: 0000-0002-9195-0399

T. V. Drozdenko², ORCID: 0000-0002-5553-2296

¹Moscow State University of Technology and Management
named after K.G. Razumovsky, Moscow, Russia

²Pskov State University, Pskov, Russia

Аннотация. Проведена сравнительная оценка влияния анионов в составе неорганических солей на биологические показатели гидробионтов в природных водах различного гидрохимического состава. Дана сравнительная оценка токсичности катиона натрия на одноклеточную водоросль *Scenedesmus quadricauda* и ракообразных *Daphnia magna* и *Hyalella azteca* при использовании солей, включающих разные анионы. Оценено влияние ионов солей, внесенных в природную водную среду с различным гидрохимическим составом, на такие показатели у *D. magna* и *H. azteca*, как плодовитость, выживание в исходных выборках и в трех последующих поколениях для выявления отдаленного токсического эффекта. Впервые установлено, что наиболее чувствительным показателем при действии высоких концентраций неорганических солей на рыб *Danio rerio* является выклев предличинок из яичевых оболочек при их нахождении в водах различного состава.

Abstract. A comparative assessment of the effect of anions in the composition of inorganic salts on the biological parameters of hydrobionts in natural waters of various hydrochemical composition has been carried out. A comparative assessment of toxicity of sodium cation to the unicellular algae *Scenedesmus quadricauda* and the crustaceans *Daphnia magna* and *Hyalella azteca* is given when using salts containing different anions. Studied has been the effect of salt ions, introduced into the natural aquatic environment with different hydrochemical compositions, on such indicators in *D. magna* and *H. azteca* as fertility, survival in the initial samples and in the three subsequent generations to identify a long-term toxic effect. For the first time, it has been established that the most sensitive indicator, under the action of high concentrations of inorganic salts on the *Danio rerio* fish, is hatching larvae from egg shells when they are in waters of various composition.

Ключевые слова: фитопланктон, зоопланктон, токсичность, региональное нормирование.

Keywords: phytoplankton, zooplankton, toxicity, regional regulation.

Введение

Защита водной среды от загрязнения не теряет своей актуальности и в наше время. В основу данного исследования положен анализ теоретических разработок и результаты экспериментов по изучению взаимодействия катионов и анионов потенциально токсичных солей при моделировании их действия на организмы, представляющие трофическую структуру гидробиоценоза [1]. Подобные исследования в водной токсикологии начались еще в XIX в. и продолжают активно проводиться последние десятилетия [2]. Устанавливаются рыбохозяйственные нормативы ПДК для воды водных объектов и определяется токсичность отдельных ионов неорганических солей [3–6]. В качестве тест-объектов используют гидробионтов на разных стадиях онтогенеза и относящихся к разным звеньям трофической цепи. В этих исследованиях оценивается совместное влияние анионов и катионов на показатели качества среды и на развитие и размножение гидробионтов [7–24].

При выполнении работы было обращено особое внимание на онтогенез гидробионтов. Многолетний опыт и множество опубликованных работ по водной токсикологии позволяет определить критические жизненные стадии водных организмов. Особое внимание уделяется выявлению критических этапов онтогенеза у гидробионтов различного систематического уровня и различных жизненных форм в условиях антропогенной нагрузки [25–30].

Целью данной работы стала оценка действия потенциально токсичных ионов на тест-организмы в экспериментальных условиях.

Материалы и методы исследования

Основная часть исследований проводилась на базе лаборатории эколого-токсикологических исследований ФГБНУ «ВНИРО», лаборатории водной экотоксикологии ООО «ЭкоСервис-А» и в Аквациентре факультета биотехнологии и рыбного хозяйства МГУТУ им. К.Г. Разумовского.

В ходе работы применялись стандартные и специальные методы гидробиологических, токсикологических, ихтиологических, гистологических и иных исследований.

Для экспериментов использовалась природная вода из следующих водотоков: верховья реки Нотика, бассейна р. Луга (Ленинградская обл.), р. Верхняя Ковдора, бассейна р. Ковдора (Мурманская область), верховья р. Белая, бассейна р. Белая (республика Башкортостан). Вода отбиралась в устойчивый меженный период, когда гидрохимическая обстановка в водотоках стабилизируется по сравнению с периодом паводка и половодья. Гидрохимический состав природных вод определяли в аккредитованной лаборатории с выдачей протоколов испытаний.

В экспериментах исследовали воздействие на организмы следующих веществ: NaNO_2 , NaNO_3 , Na_2SO_4 , Na_2HPO_4 .

Для оценки влияния солей натрия на фитопланктон в качестве тест-объекта использовали альгологически чистую культуру одноклеточных водорослей *Sc. quadricauda* (Turpin) Brébisson. Водоросли культивировали на природной воде при искусственном освещении 3000 лк, продолжительности светового дня 12 часов и температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Начальная плотность клеток в эксперименте составляла 25 тыс. кл./мл. Опыт продолжался 14 суток. Контролем служила природная вода без добавления вещества. Влияние вещества на водоросли оценивали по изменению оптической плотности, измеренной на фотометре «Эксперт-003» при длине волны 626 нм.

Для оценки влияния солей натрия на зоопланктон использовали пресноводных ракообразных *D. magna* Straus возрастом одни сутки. Эксперименты проводили при искусственном освещении 400–600 лк, продолжительности светового дня 12 часов и температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Рачков ежедневно кормили зеленой водорослью *Chlorella vulgaris* Beijerinck. Продолжительность опытов составляла 30 суток. Подсчитывали средние значения выживаемости, плодовитости в пересчете на одну самку за 4 помета, процент отклонений от величины реальной плодовитости по отношению к контролю.

Для оценки влияния веществ на нектических ракообразных использовали рачков *H. azteca* Saussure. Эксперименты проводили в природной воде при температуре 21°C и искусственном освещении 600 лк с продолжительностью светового дня 12 часов. В эксперименте оценивали выживаемость рачков в течение 30 суток.

Для оценки влияния солей натрия на рыб в качестве тест-объекта использовали *D. rerio* Hamilton. Проводили наблюдения за эмбриональным развитием и выклевом предличинок в контроле и в исследуемых концентрациях вещества. Икру для экспериментов получали от здоровых производителей из стабильной маточной культуры рыб. Опыт проводили в термостатируемых условиях. Оценивали состояние икры и ход выклева. Учитывали особенности развития и выживаемость эмбрионов, а также фиксировали морфологические изменения у эмбрионов в процентах по отношению к контролю. Оценивали скорость выклева и способность к переходу личинок на активное питание. Длительность опыта составила 8 суток.

Полученные результаты статистически обработаны с использованием программного обеспечения Excel и с уровнем достоверности $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Изучаемые водотоки расположены в разных природно-климатических поясах, обладают разным гидрохимическим составом, имеют разный гидрологический режим, различаются по периодам паводков,

половодья, периодам межени. Так, природное содержание сульфатов в воде заметно отличается от водотока к водотоку (табл. 1).

Таблица 1. Гидрохимические показатели воды, мг/л

Водный объект	Гидрохимические показатели воды, мг/л						
	сульфаты	фосфаты	нитриты	нитраты	натрий	калий	магний
р. Нотика	43,0±20,0	0,037	0,0017	0,18	180,0±15,0	11,0	33,0±15,0
р. Верхняя Ковдора	менее 20,0	0,05±0,008	0,002–0,02	менее 0,1	1,9	–	1,8

При внесении сульфата натрия в воду из верховьев р. Нотика и из р. В. Ковдора, картина токсичности изменялась незначительно: концентрация, описанная как недействующая, составила 250,0 мг/л и 200,0 мг/л, соответственно. При концентрации 750,0 мг $\text{SO}_4/\text{л}$ установлены статистически значимые отклонения значений относительно контроля по плодовитости рачков в воде из верховьев р. Нотика, в то время как статистически значимые отклонения по плодовитости рачков были установлены при концентрации этой соли 300,0 мг $\text{SO}_4/\text{л}$ в воде р. В. Ковдора. Несмотря на присутствие в воде р. Нотика дополнительного количества сульфатов 43,0±20,0 мг/л, вода из нее оказалась менее токсична для *Sc. quadricauda*, чем вода из р. В. Ковдора, в которой природное содержание сульфатов менее 20,0 мг/л.

В отношении фосфатов менее токсичной для организмов оказалась вода из р. В. Ковдора. При проведении испытаний с водорослью *Sc. quadricauda* дополнительное внесение фосфата оказывало действие в концентрации 2,5 мг/л в воде р. В. Ковдора, при этом в воде из р. Нотика достоверное влияние на *Sc. quadricauda* было отмечено уже при 0,75 мг/л. Такая же картина наблюдалась на эмбриональной и постэмбриональной стадии рыб и у рыб во взрослом состоянии. Более чувствительными к ковдорской воде оказались рачки *D. magna*: воздействие на них было отмечено уже в концентрации 5,0 мг/л, между тем в воде из р. Нотика действие на *D. magna* проявлялось в более высокой концентрации – 25,0 мг/л.

При внесении натрия азотистокислого в воду из верховья р. Нотика и в воду р. Белая было отмечено, что вода р. Нотика становилась более токсичной для всех тест-организмов. Достоверно недействующая концентрация натрия азотистокислого отличалась в изученных водах в 10 раз: более низкое ее значение установлено для вод р. Нотика – 0,08 мг/л. Азотистокислый натрий, начиная с концентрации 0,2 мг $\text{N-NO}_2/\text{л}$, оказывал влияние на все показатели у ракообразных, содержащихся в воде р. Нотика, но при этом в максимальной из оцениваемых концентрации 0,76 мг $\text{N-NO}_2/\text{л}$ не действовал на *D. magna* по тем же показателям в воде из верховьев р. Белая. Азотнокислый натрий влиял на ракообразных в концентрации 45,0 мг $\text{N-NO}_3/\text{л}$ и выше, отмечались достоверные отличия по плодовитости у поколений F1 и F2 по сравнению с контролем.

В двух экспозициях *H. azteca* показала высокую чувствительность к вносимым солям (табл. 2).

Таблица 2. Максимальные недействующие концентрации солей натрия в воде различных водотоков, мг/л

Соль	Водный объект	<i>Sc. quadricauda</i>	<i>D. magna</i>	<i>H. azteca</i>	<i>D. rerio</i>		Максимальная недействующая концентрация
					икра, личинки	взрослые	
NaNO_2	р. Нотика	0,2	0,1	–	0,1	0,08	0,08
	р. Белая	0,8	0,76	–	2,5	1,0	0,76
NaNO_3	р. Нотика	30,0	30,0	–	50,0	12,0	12,0
Na_2SO_4	р. Нотика	250,0	500,0	–	250,0	750,0	250,0
	р. Верхняя Ковдора	400,0	200,0	–	250,0	250,0	200,0
Na_2HPO_4	р. Нотика	0,5	10,0	0,5	2,5	0,5	0,5
	р. Верхняя Ковдора	1,0	2,5	1,0	10,0	1,0	1,0

Наибольшей токсичностью для рыб *D. rerio* обладали соли азотистокислого натрия и гидрофосфат натрия, что ярко выражено при гистологическом анализе. Как уже отмечалось, концентрация 0,08 мг N-NO₂/л являлась недействующей для взрослых рыб, а концентрация 0,16 мг N-NO₂/л оказывала патологическое действие как на жаберную ткань, так и на состояние печени.

Гистологическая картина жабр *D. rerio* из контроля и при концентрации фосфата 0,5 мг Р/л соответствовала норме. У рыб под воздействием концентрации 1,0 и 2,5 мг Р/л в жабрах выявлена гиперемия респираторного эпителия. Печень данио из контрольной группы и концентрации 0,5 мг Р/л также в целом соответствовала норме. Во всех остальных концентрациях в печени наблюдалась жировая дистрофия.

Заключение

В результате исследований установлено, что токсичность солей, включающих одинаковый катион (на примере катиона натрия), но разные анионы, для представителей фитопланктона (*Sc. quadricauda*) и зоопланктона (*D. magna*) проявляется по-разному в зависимости от свойств и гидрохимического состава природных водных объектов.

Азотистокислый натрий и азотнокислый натрий оказывали одинаковое действие на фито- и зоопланктон в водах из р. Нотика и р. Белая. При воздействии сульфата натрия наиболее чувствительными оказались водоросли в воде из верховьев р. Нотика и рачки в воде р. В. Ковдора. Ракообразные в воде из данных рек показали большую устойчивость к действию гидрофосфата натрия, чем водоросли. Гидрофосфат натрия в концентрации 25,0 мг Р/л и выше в воде из верховья р. Нотика влиял на плодовитость рачков в поколении F₃. В воде р. В. Ковдора статистически значимые отклонения установлены при концентрации 5,0 мг Р/л.

Только в ряде случаев ранние стадии развития рыб оказались лимитирующим показателем при изучении воздействия солей (например, при влиянии на них азотистокислого натрия в воде верховья р. Нотика). В максимальных исследуемых концентрациях 1,0 и 2,5 мг N-NO₂/л смертность превышала контрольные значения и составляла 23,3 и 36,7% соответственно. Общая выживаемость личинок рыб, перешедших на стадию активного питания, отличалась от контроля при концентрациях 0,5 мг N-NO₂/л и выше.

По степени убывания токсичности в природных водах соли натрия можно ранжировать следующим образом: NaNO₂ (для вод р. Нотика), Na₂HPO₄ (для вод р. Нотика), NaNO₂ (для вод р. Белая), Na₂HPO₄ (для вод р. В. Ковдора), NaNO₃ (для вод р. Нотика), Na₂SO₄ (для вод р. В. Ковдора), Na₂SO₄ (для вод р. Нотика).

Токсичность вещества зависит не только от его строения, но и от свойств водной среды, поэтому при установлении лимитов потенциально токсичных загрязняющих веществ в природных водах следует отдавать предпочтение разработке региональных нормативов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Karimian N., Johnston S.G., Burton E.D. Acidity generation accompanying iron and sulfur transformations during drought simulation of freshwater re-flooded acid sulfate soils // *Geoderma*. 2017. Vol. 285. P. 117–131.
2. Cardenas M.B., Wilson J., Zlotnik V.A. Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange // *Water Resources Research*, 2004. 40 (8). P. 1–13. DOI:10.1029/2004wr003008
3. Шилова Н.А., Рогачева С.М. Комбинированное воздействие ионов тяжелых металлов и сульфатного засоления на функционирование гидробионтов // *Экология и защита окружающей среды : сб. тез. докладов Международной научно-практической конференции*. Минск, 19–20 марта 2014 г. Минск, 2014. С. 116–119.
4. Денисюк А.В., Тригуб А.Г., Житкова А.А., Пачулия В.Б. Воздействие сульфатов на зеленые одноклеточные водоросли *Scenedesmus quadricauda* // *Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации*. Пенза: МНИЦ ПГАУ, 2023. С. 343–346.
5. Житкова А.А., Тригуб А.Г., Пачулия В.Б., Денисюк А.В. Воздействие некоторых сульфатных солей на стандартном тест-объекте *Daphnia magna* // *Материалы IX международной научно-практической конференции*. Ставрополь: СтГМУ, 2023. С. 184–187.
6. Какой вред наносят сульфаты в питьевой воде // Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Марий Эл. URL: http://12.rosпотребнадзор.Ru/Rss_All/-/Asset_Publisher/Kq6J/Content/Id/285043 (дата обращения: 06.10.2024).
7. Строганов Н.С. Научные основы установления ПДК токсических веществ в открытых водоемах (Биологические аспекты) // *Водные ресурсы*. 1974. № 1. С. 110–121.

8. *Строганов Н.С., Путинцев А.И., Исакова Е.Ф.* Метод токсикологического контроля сточных вод // Научные доклады Высшей школы. Биологические науки. 1979. № 3. С. 90–96.
9. *Филенко О.Ф.* Опыт применения модельных водных экосистем для решения исследовательских и практических задач // Биологические процессы в загрязненных модельных водоемах. М.: МГУ, 1984. С. 174–192.
10. *Максимов В.Н., Никитина О.Г., Носов В.Н.* Биоиндексация нарушения очистки сточных вод // Тезисы доклада IV Всесоюзного гидробиологического съезда. (Киев, 1–4 декабря 1981 г.). Ч. 3. Киев, 1981. С. 36–37.
11. *Максимов В.Н.* Проблемы комплексной оценки качества природных вод (экологические аспекты) // Гидробиологический журнал. 1991. Т. 27, № 3. С. 8–12.
12. *Симаков Ю.Г.* Онтогенетические и токсикологические аспекты защиты гидробионтов от антропогенных воздействий : автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. М., 1986. 53 с.
13. *Симаков Ю.Г., Кулаев С.Н.* Морфологические перестройки у гидробионтов под влиянием широкополосного электромагнитного облучения // Состояние и перспективы научно-практических разработок в области маринкультуры России. М.: ВНИРО, 1996. С. 295–303.
14. *Симаков Ю.Г.* Эмбрионы и личинки рыб // Методические указания по установлению ПДК и ОБУВ загрязняющих веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: ВНИРО, 1998. С. 77–79.
15. *Патин С.А.* Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность мирового океана. М.: Пищевая промышленность, 1979. 304 с.
16. *Патин С.А.* Экологические проблемы освоения нефтегазовых ресурсов морского шельфа. М.: ВНИРО, 1997. 349 с.
17. *Флеров Б.А.* Актуальные проблемы водной токсикологии // Борок: ИБВВ РАН, 2004. С. 248.
18. *Рыжков Л.П., Артемьева Н.В., Горохов А.В.* Водная токсикология и комплексная оценка природных вод // Антропогенные влияния на водные экосистемы : материалы конф., посвященной 100-летию со дня рождения проф. Н.С. Строганова / под ред. О.Ф. Филенко. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2005. С. 21–32.
19. *Филенко О.Ф., Михеева И.В.* Основы водной токсикологии. М.: Колос, 2007. 144 с.
20. *Карманова И.В.* Экологические аспекты водной токсикологии // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2008. № 7. С. 137–142.
21. *Моисеенко Т.И.* Водная экотоксикология: теоретические принципы и практическое приложение // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 5. С. 554–565.
22. *Филенко О.Ф., Чуйко Г.М.* Водная экотоксикология в России: от прошлого к настоящему // Труды Института биологии внутренних вод РАН. 2017. № 77 (80). С. 124–142.
23. *Моисеенко Т.И.* Водная экотоксикология в решении задач оценки качества вод и «здоровья» экосистем // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность : тезисы докладов Международной научной конференции, посвященной 150-летию Севастопольской биологической станции – Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского и 45-летию НИС «Профессор Водяницкий» Севастополь, 2021. С. 38–39.
24. Сульфаты в сточной воде // Испытательный центр НОРТЕСТ. URL: <https://nortest.pro/stati/voda/sulfaty-v-stochnoj-vode.html> (дата обращения: 06.10.2024).
25. *Сотников Ф.И.* Критические периоды в раннем онтогенезе гидробионтов и их роль в биотестировании и эколого-рыбохозяйственном нормировании : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2005. 22 с.
26. *Никифоров-Никишин А.Л.* Морфологические особенности хрусталика гидробионтов и их применение в водной токсикологии : дис. ... д-ра биол. наук. М., 2005. С. 18.
27. Патент № 2522542 Российская Федерация, МПК G01N 33/18 (2006.01). Способ определения токсичности водной среды: № 2013122241/15 : заявл. 14.05.2013 : опубл. 20.07.2014. Бюл. № 20 / А.Э. Балаян, М.Н. Саксонов, Д.И. Стом, А.Д. Стом; заявитель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет». 6 с. // Yandex.ru: патенты. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2522542C1_20140720 (дата обращения: 10.10.2024).
28. *Зуева Н.В., Козлова А.В., Куличенко А.Ю.* Опыт использования токсикологических характеристик в интегральной оценке экологического состояния водного объекта // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2018. № 3. С. 43–56.
29. *Саидов Д.М., Косевич И.А.* Влияние тяжелых металлов (Cu, Co, Cd) на раннее развитие *Mytilus edulis* (mollusca; bivalvia) // Экология. 2019. № 1. С. 55–61.
30. *Astaykina A., Streletsii R., Maslov M., Kazantseva S., Karavanova E., Gorbatov V.* Novel Pesticide Risk Indicators for Aquatic Organisms and Earthworms // AGRONOMY-BASEL, MDPI Publishing (Basel, Switzerland, Switzerland), № 10. P. 1–19.

Поступила в редакцию 22.10.2024 г.
Принята к печати 23.12.2024 г.

Тригуб Анатолий Григорьевич, эксперт Аквациентра факультета биотехнологии и рыбного хозяйства, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского; e-mail: morflot931@gmail.com

Anatoly G. Trigub, expert of the Aquacenter, Faculty of Biotechnology and Fisheries, Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky; e-mail: morflot931@gmail.com

Медянкина Мария Владимировна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и природопользования факультета биотехнологий и рыбного хозяйства, Московский государственный университет им. К.Г. Разумовского; e-mail: 79263841762@ya.ru

Mariya V. Medyankina, Candidate of Biology, associate professor of the Department of Ecology and Environmental Management of the Faculty of Biotechnology and Fisheries, Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky; e-mail: 79263841762@ya.ru

Дрозденко Татьяна Викторовна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и экспериментальной биологии, старший научный сотрудник лаборатории комплексных экологических исследований, Псковский государственный университет; e-mail: tboichuk@mail.ru

Tatiana V. Drozdenko, Candidate of Biology, associate professor of the Department of Ecology and Experimental Biology, senior researcher of the Laboratory of Integrated Environmental Research, Pskov State University; e-mail: tboichuk@mail.ru