

ЭКОЛОГИЯ

Влияние содержания стронция в воде на фито- и зоопланктон

DOI 10.37663/0131-6184-2022-4-15-19

С.А. Перков – студент факультета биотехнологий и рыбного хозяйства, кафедра экологии и природопользования;
А.Г. Тригуб – ассистент преподавателя факультета биотехнологий и рыбного хозяйства, кафедра экологии и природопользования, менеджер по качеству лаборатории водной экотоксикологии ООО «ЭкоСервис-А»;
 кандидат биологических наук, доцент **М.В. Медянкина**; кандидат биологических наук, доцент **Т.П. Хайрулина** – факультет биотехнологий и рыбного хозяйства, кафедра экологии и природопользования Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (МГУТУ им. К.Г. Разумовского)
Е.О. Попова – заместитель начальника отдела научно-методического обеспечения информационных ресурсов и баз данных Центрального управления по рыбохозяйственной экспертизе, воспроизводству водных биологических ресурсов и акклиматизации (ФГБУ «ЦУРЭН»)

@ 79263841762@yandex.ru

Ключевые слова: стронций, фитопланктон, зоопланктон, водные биологические ресурсы, биотестирование

Keywords: strontium, phytoplankton, zooplankton, aquatic biological resources, biotesting

IMPACT OF STRONTIUM CONCENTRATION IN WATER ON PHYTOPLANKTON AND ZOOPLANKTON

S.A. Perkov – Student of the Faculty of Biotechnology and Fisheries, Department of Ecology and Nature Management;
A.G. Trigub – Assistant Lecturer of the Faculty of Biotechnology and Fisheries, Department of Ecology and Nature Management, Quality Manager of the Laboratory of Aquatic Ecotoxicology LLC "Ecoservice-A";
 Candidate of Biological Sciences, Associate Professor **M.V. Medyankina**; Candidate of Biological Sciences, Associate Professor **T.P. Khairulina** – Faculty of Biotechnology and Fisheries, Department of Ecology and Nature Management, Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (MGUTU named after K.G. Razumovsky)
E.O. Popova – Deputy Head of the Department of Scientific and Methodological Support of Information Resources and Databases of the Central Directorate for Fisheries Expertise, Reproduction of Aquatic Biological Resources and Acclimatization (FSBI "TSUREN")

The article presents the results of experimental studies to assess the impact of heavy metals on the functioning of phyto- and zooplankton (*Scenedesmus quadricauda*, *Daphnia magna*). Determination of inactive and threshold concentration of strontium, toxicity parameters and the degree of acute toxicity has been carried out. As a result of the studies the data on the effect of strontium on hydrobionts of different trophic links were obtained. For zooplankton in terms of survival rate the maximum allowable concentration of strontium was 4 mg/l, in terms of fecundity - 2 mg/l in terms of fecundity. According to the indicator of single-celled algae *Sc. quadricauda* viability (cell number) in the chronic experiment the maximum allowable concentration of strontium is 2 mg/l.

ВВЕДЕНИЕ

Стронций – постоянный компонент гидросферы Земли. Поведение стронция в водной среде зависит от многих факторов. Первостепенную роль играет его содержание в породах и почвах водосборного бассейна либо водовмещающих породах (для подземных и грунтовых вод) [6]. Исследование содержания стронция в почвенных и грунтовых водах показало, что содержание стронция в природных водах последовательно увеличивалось в ряду: атмосферные осадки («следовые» количества стронция), воды поверхностного стока (2,5 мг/дм³), почвенные воды (7 мг/дм³), озёрная вода (23 мг/дм³) [2]. В воде рек содержится менее 10⁻⁵% этого элемента (0,1 мг/дм³) [1]. Источниками стронция в при-

родных водах являются горные породы – наибольшие количества его содержат гипсоносные отложения. Низкая концентрация стронция в природных водах объясняется слабой растворимостью их сернокислых соединений (растворимость SrSO₄ при 18°C составляет 114 мг/дм³). В пресных водах концентрация стронция обычно намного ниже 1 мг/дм³ и выражается в микрограммах на литр. Встречаются районы с повышенной концентрацией этого иона в водах. Подземные воды основное количество стронция получают из почвенных горизонтов, в результате инфильтрации атмосферной влаги сквозь почвогрунты. В подземных водах биосферы содержание стронция в значительной мере контролируется

их сульфатностью, в связи с низкой растворимостью целестина им бедны сульфатные воды. Наоборот, в подземных хлоридных водах условия для миграции стронция благоприятны, в связи с отсутствием в них осадителя металла – сульфат-ионов SO_4^{2-} . Поэтому глубинные хлоридные пластовые воды артезианских бассейнов часто обогащены стронцием. При тектонических поднятиях подобные воды по разломам местами поступают в верхние структурные этажи земной коры и смешиваются с сульфатными водами, где формируется сульфатный барьер, на котором вместе с гипсом осаждается целестин [7]. Будучи близок к кальцию по химическим свойствам, стронций резко отличается от него по своему биологическому действию. Избыточное содержание этого элемента в природных водах вызывает «уровскую болезнь» у человека и животных (по названию р. Уров в Восточном Забайкалье) – поражение и деформацию суставов, задержку роста и другие симптомы. Хроническое поступление стронция в водную среду вызывает накопление металлов в живых организмах и представляет для них серьезную опасность, из-за выраженной способности этого токсичного элемента к накоплению в тканях, особенно – костной. Стронций (Sr) представляет серьезную опасность для рыб из-за его структурного сходства с кальцием (Ca), которое обуславливает способность Sr замещать Ca в костной и других тканях. Следствием этого является нарушение обмена кальция в организме, а также его участия в кальций-зависимых метаболических процессах.

Цель настоящей работы – необходимость изучения влияния стронция на пресноводный фито- и зоопланктон. Для достижения цели были поставлены задачи: исследовать влияние стронция на качество воды, изучить влияние на основных представителей водной экосистемы –

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований оценки воздействия стронция на функционирование фито- и зоопланктона (*Scenedesmus quadricauda*, *Daphnia magna*). Проведено определение недействующей и пороговой концентрации стронция, параметров токсичности и степени острой токсичности. В результате проведенных исследований получены данные о влиянии стронция на гидробионты различных трофических звеньев. Для зоопланктона, по показателю выживаемости, максимально допустимая концентрация стронция составила 4 мг/л, по плодовитости – 2 мг/л. По показателю жизнедеятельности одноклеточных водорослей *Sc. quadricauda* (численность клеток), в хроническом эксперименте, максимально допустимая концентрация стронция составляет 2 мг/л.

на чувствительные тест-объекты, прежде всего – на фито- и зоопланктон, выявить лимитирующие звенья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили в соответствии с «Методическими указаниями по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения», утвержденных Приказом Росрыболовства № 695 от 04.08.2009 года [5].

Для культивирования тест-организмов и проведения экспериментов использовали воду из р. Верхняя Ковдора (Мурманская область), отобранную в летний период 2020 г. (рис. 1).

Координаты отбора проб воды – N 67 33.485', E 30 22.828'.



Рисунок 1. Отбор проб воды из реки Верхняя Ковдора для исследований, лето 2020 года
Figure 1. Sampling of water from the Upper Kovdora River for research, summer 2020

Гидрохимический состав исследованной воды следующий: БПК_{полн} – менее 0,5 мгО₂/дм³, взвешенные вещества – 0,5±0,1 мг/дм³, аммоний-ион <0,05 мг/дм³, нитраты – <0,1 мг/м³, нитриты – <0,002 мг/м³, фосфаты – 0,050 мг/дм³, фосфор общий в пересчете на PO₄ – 0,1 мг/дм³, хлорид-ионы – 0,90 ± 0,21 мг/дм³, стронций – 0,1 мг/дм³.

Исходные растворы вещества (в высокой концентрации) готовили на дистиллированной воде. Исследуемые концентрации вещества (хлорида стронция) готовили из исходного раствора на природной воде из р. Верхняя Ковдора. Концентрации хлорида стронция указаны в пересчете на атом стронция.

Оценка влияния вещества на фитопланктон – *Scenedesmus quadricauda*. Для оценки влияния вещества на фитопланктон использовали, в качестве тест-объекта, альгологически чистую культуру одноклеточных водорослей *Scenedesmus quadricauda*. Водоросли культивировали на среде Прата. Условия культивирования и проведения экспериментов: освещение искусственное – 3000 лк, продолжительность светового дня 12 часов; температура 20±2°C. В опыт брали культуру в экспоненциальной фазе роста (через 3 суток после пересева культуры). Для определения пригодности культуры водорослей для биотестирования предварительно оценивали чувствительность культуры водорослей к стандартному токсиканту K₂Cr₂O₇. Полученная

величина ЛК₅₀ (48 ч.) укладывается в нормативный диапазон реагирования для данного вида водорослей (1,3-2,5 мг/л). Опыты проводили в колбах объемом 100 см³, содержащих по 50 см³ контрольных и опытных растворов. Повторность в опыте и контроле трехкратная. Начальная плотность клеток в эксперименте – 25 тыс. кл./мл. Длительность опыта составляла 14 суток. Контролем служила среда Прата без добавления вещества. Влияние вещества на водоросли оценивали по изменению оптической плотности, измеренной на фотометре «Эксперт-003» (инв.№00000029) при длине волны 626 нм.

Оценка влияния вещества на зоопланктон – *Daphnia magna*. В качестве тест-объекта использовали пресноводных ракообразных *Daphnia magna*. Эксперименты проводили при искусственном освещении 3000 лк, продолжительности светового дня 12 часов и температуре 20±2°C. В опыт брали односуточных рачков. Для определения их пригодности для биотестирования предварительно оценивали их чувствительность к стандартному токсиканту K₂Cr₂O₇. Полученная величина ЛК₅₀ 24 укладывается в нормативный диапазон реагирования для данного тест-организма (0,9-2,0 мг/л). Для исследования действия вещества на плодовитость, в опытные стаканы заливали по 250 мл исследуемых растворов, в контрольные стаканы исследуемое вещество не добавляли. В каждый стакан помещали по 5 экз. одновозрастных даф-

Таблица 1. Динамика изменения оптической плотности водорослей *Scenedesmus quadricauda* при различных концентрациях стронция / **Table 1.** Dynamics of changes in the optical density of *Scenedesmus quadricauda* algae at different strontium concentrations

Концентрация мг/л	Сутки эксперимента				
	1	3	7	10	14
Оптическая плотность, М (m)*					
Контроль	0,055(0,005)	0,233(0,008)	0,856(0,040)	1,558(0,071)	1,706(0,066)
0,5	0,051(0,008)	0,223(0,021)	0,821(0,091)	1,514(0,092)	1,561(0,318)
Td	1,59	0,83	0,69	0,64	0,75
1,0	0,053(0,011)	0,232(0,018)	0,854(0,087)	1,523(0,061)	1,724(0,007)
Td	0,05	0,10	0,03	0,63	0,45
2,0	0,054(0,010)	0,222(0,014)	0,835(0,073)	1,460(0,098)	1,687(0,039)
Td	0,18	1,33	0,49	1,38	0,43
10,0	0,051(0,002)	0,211(0,011)	0,750(0,081)	1,338(0,126)	1,469(0,077)
Td	1,41	2,33	2,30	2,58	3,90
20,0	0,052(0,002)	0,170(0,009)	0,793(0,012)	1,222(0,008)	1,170(0,071)
Td	0,59	10,6	2,94	8,0	9,40
% от контроля					
Контроль	100	100	100	100	100
0,5	92,1	95,9	96,0	97,2	91,5
1,0	97,0	99,6	99,8	97,7	101,0
2,0	98,2	95,4	97,6	93,6	98,85
10,0	93,3	90,4	87,7	85,8	86,11
20,0	94,5	72,8	92,7	78,4	68,6

Примечание: жирным шрифтом выделены фактические значения критерия Стьюдента, которые выше статистических, что указывает на статистическую значимость выявленных различий между средними значениями показателя; М – среднее значение оптической плотности; m – стандартная ошибка среднего, Td при p≤0.05

Таблица 2. Результаты хронических опытов на *Daphnia magna* при различных концентрациях стронция / **Table 2.** Results of chronic experiments on *Daphnia magna* at different strontium concentrations

Р	С, мг/л	Выживаемость, %	Плодовитость на 1 самку		
			M±m	%	Td
F ₀	(контроль)	100	35,6(0,72)	100	-
	1,0	100	35,8(0,20)	100,4	0,10
	2,0	100	32,8(0,24)	92,0	1,50
	3,0	100	36,6(0,11)	102,8	0,55
	4,0	90,0	30,3(0,39)	85,1	2,63
	5,0	85,0 Td-3,0	26,5(0,26)	74,3	4,80
F ₁	(контроль)	100	37,0(0,08)	100	-
	1,0	100	37,4(0,24)	101,2	0,55
	2,0	100	36,5(0,58)	98,6	0,32
	3,0	100	34,5(0,35)	93,4	2,37
	4,0	95,0	27,2(0,51)	73,5	7,10
	5,0	90,0	24,8(0,24)	67,2	14,8
F ₂	(контроль)	100	35,0(0,30)	100	-
	1,0	100	36,3(0,32)	103,6	1,15
	2,0	100	37,0(0,46)	105,7	1,46
	3,0	100	35,4(0,27)	101,0	0,35
	4,0	95,0	31,8(0,42)	90,7	2,54
	5,0	90,0	26,8(0,25)	76,6	8,45
F ₃	(контроль)	100	37,1(0,26)	100	-
	1,0	100	37,3(0,25)	100,7	0,27
	2,0	100	33,1(0,77)	89,2	2,0
	3,0	100	32,0(0,43)	86,1	4,12
	4,0	100	27,0(0,25)	72,9	11,20
	5,0	95,0	25,0(0,49)	67,4	8,66

Примечание: жирным шрифтом выделены фактические значения критерия Стьюдента, которые выше статистических, что указывает на статистическую значимость выявленных различий между средними значениями показателя; Р – поколение, С – концентрация, М – среднее значение показателя, m – доверительный интервал, Td – значение критерия Стьюдента

ний, повторность каждой линии – 4-кратная. Рачков ежедневно кормили зелеными водорослями (*Chlorella vulgaris*). Продолжительность опытов на дафниях определяли временем появления четырех пометов у контрольных рачков, что составляло 21 день.

Продолжительность хронических экспериментов по выживаемости и плодовитости 3-х поколений рачков также составляла 21 сутки, суммарное количество суток хронического эксперимента по выживаемости и плодовитости от исходных самок до 3-го поколения включительно (F₀-F₃) составило около 90 суток. По окончании опыта подсчитывали средние значения выживаемости, плодовитости, в пересчете на одну самку за 4 помета, процент отклонений от величины реальной плодовитости по отношению к контролю.

Определение недействующей и пороговой концентраций. Для определения недействующей и пороговой концентраций по каждому показателю оценивали статистическую значимость различий величин показателя в контроле и в растворах веществ с помощью следующих

методов: для количественных показателей применяли критерий Стьюдента; для бинарных (альтернативных) показателей применяли точный критерий Фишера (односторонний). Уровень значимости принимали равным 0,05. Недействующими для каждой тест-функции считали концентрации, в которых величина показателя не отличалась статистически значимо от величины в контроле. За МДК для тест-функции и тест-объекта принимали наибольшую из недействующих концентраций. Следующую, более высокую из исследованных концентраций, принимали за пороговую.

Определение параметров токсичности (ЛК). Для расчета параметров токсичности применяли линейную регрессионную модель. Определяли следующие параметры токсичности: ЛК₅₀ для показателя гибели. Вычисления выполняли в статистической среде Excel.

Определение степени острой токсичности. Степень острой токсичности вещества оценивали на основании величины ЛК₅₀, вычисленной по результатам острого опыта (длительностью 72-96 ч. для разных тест-организмов),

в соответствии с ГОСТ Р 54496–2011 [3] и ГОСТ Р 56236-2014 [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние вещества на фитопланктон – *Scenedesmus quadricauda*. Динамика изменений оптической плотности клеток водорослей *Scenedesmus quadricauda*, при различных концентрациях стронция, представлена в таблице 1.

По результатам воздействия стронция на оптическую плотность водорослей *Sc. quadricauda* можно заключить, что в диапазоне концентраций (0,5-2,0 мг/л) статистически значимых отклонений от контроля не наблюдалось на протяжении всего эксперимента, в концентрации 10,0 мг/л и выше наблюдались статистически значимые отклонения от контроля, начиная с 3 суток.

Таким образом, экспериментально установлено, что максимально допустимой концентрацией стронция для фитопланктона является концентрация 2,0 мг/л, пороговой является 10,0 мг/л.

Влияние вещества на зоопланктон – *Daphnia magna*. Влияние стронция на выживаемость и продукционные (плодовитость) характеристики дафний исследовали в хронических экспериментах, проведенных с тремя поколениями (табл. 2).

В растворах с исследованными концентрациями вещества достоверное снижение по показателю выживаемости рачков установлено в поколении F_0 – при концентрации стронция 5,0 мг/л выживаемость рачков снизилась на 25%.

Плодовитость (среднее суммарное количество молодежи на одну самку за время эксперимента) дафний в диапазоне концентраций 1,0-2,0 мг/л не выявила достоверных отличий относительно контроля, однако в концентрации 3,0 мг/л и выше установлены статистически значимые отклонения значений относительно контроля по плодовитости рачков.

Таким образом, максимально допустимая концентрация стронция для *Daphnia magna*, по показателю выживаемости, составляет 4,0 мг/л, пороговая – 5,0 мг/л. По показателю плодовитости максимально допустимая концентрация составляет 2,0 мг/л, пороговая – 3,0 мг/л.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены данные о влиянии стронция на гидробионты различных трофических звеньев. По показателю жизнедеятельности одноклеточных водорослей *Sc. quadricauda* (численность клеток) в хроническом эксперименте максимально допустимая концентрация стронция составляет 2 мг/л. Для зоопланктона (тест-объект *D. magna*) по показателю выживаемости максимально допустимая концентрация стронция составила 4 мг/л, по плодовитости – 2 мг/л.

Полученные результаты можно использовать в дальнейшем для обоснования регионального норматива ПДК для вод с природными особен-

ностями, для совершенствования методологии разработки региональных нормативов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. изд. 2-ое, дополненное. – М.: АН СССР, 1957. – 238 с.
1. Vinogradov A.P. Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils. ed. 2nd, supplemented. – М.: USSR Academy of Sciences, 1957. – 238 p.
2. Власов М.А. и др. Бор и стронций в почвенных и грунтовых водах и минеральных озерах соленакопления Восточной Сибири // Микроэлементы в биосфере и их применение в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока. – Улан-Удэ, 1973. – С. 113-117.
2. Vlasov M.A. et al. Boron and strontium in soil and groundwater and mineral lakes of salt accumulation in Eastern Siberia // Trace elements in the biosphere and their application in agriculture and medicine of Siberia and the Far East. – Ulan-Ude, 1973. – pp. 113-117.
3. ГОСТ Р 54496-2011 (ИСО 8692:2004) Вода. Определение токсичности с использованием зеленых пресноводных одноклеточных водорослей: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2011-11-14 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. Официальное. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 58 с. – Текст (визуальный): непосредственный.
3. GOST R 54496-2011 (ISO 8692:2004) Water. Toxicity determination using green freshwater unicellular algae: National Standard of the Russian Federation: date of introduction 2011-11-14 / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. – Official edition. – Moscow: Standartinform, 2012. – 58 p. – Text (visual): direct.
4. ГОСТ Р 56236-2014 (ИСО 6341:2012) Вода. Определение токсичности по выживаемости пресноводных ракообразных *Daphnia magna* Straus: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2016-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. Официальное. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 43 с. – Текст (визуальный): непосредственный.
4. GOST R 56236-2014 (ISO 6341:2012) Water. Determination of toxicity by survival of freshwater crustaceans *Daphnia magna* Straus: national Standard of the Russian Federation: date of introduction 2016-01-01 / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. – Official edition. – Moscow: Standartinform, 2016. – 43 p. – Text (visual): direct.
5. Методические указания по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения», утв. приказом Росрыболовства № 695 от 04.08.2009 г.
5. Methodological guidelines for the development of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance", approved by Rosrybolovstvo Order No. 695 of 04.08.2009.
6. Мур Дж. В. Тяжелые металлы в природных водах // М.: Мир, 1987. – 488 с.
6. Moore J. V. Heavy metals in natural waters // Moscow: Mir, 1987. – 488 p.
7. Перельман А.И. Геохимия природных вод // М.: Наука, 1982. – 154 с.
7. Perelman A.I. Geochemistry of natural waters // Moscow: Nauka, 1982. – 154 p.