УДК 574.635

НИТЧАТЫЕ ВОДОРОСЛИ ОЗЕРА КЕНОН КАК ОБЪЕКТ БИОРЕМЕДИАЦИИ

Куклин А.П.

ФАНО ФГБУН «Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения
Российской академии наук», Чита, e-mail: kap0@mail.ru

В статье приведены сведения о нитчатых водорослях оз. Кенон и содержании тяжелых металлов в доминирующих видах водорослей. Расчеты показывают, что 74 % массы водорослей сосредоточено в самой загрязненной тяжелыми металлами литорали озера. Здесь масса накопленного Mo, Mn, Co ниже 50 % от всего аккумулированного водорослями, а для Cu, Zn, Cd, Hg, Pb доля в общем количестве аккумулированных металлов превышает 75 %. Здесь наиболее перспективна организация мероприятий по биоремедиации. Однако из-за малого запаса нитчатых водорослей (15 тонн) проведение биоремедиации малоэффективно.

Ключевые слова: нитчатые водоросли, биоремедиация, тяжелые металлы, оз. Кенон

FILAMENTOUS ALGAE LAKE KENON AS OBJECT FOR BIOREMEDIATION

Kuklin A.P.

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, e-mail: kap0@mail.ru

The article presents data on filamentous algae lake Kenon and the content of heavy metals in the dominant algal species. Calculations show that 74% of the mass of algae is concentrated in the heavy metal pollution of the lake littoral. Here, the accumulated weight of only Mo, Mn, Co is less than 50% of the accumulated algae and for Cu, Zn, Cd, Hg, Pb share of total accumulated metals exceeds 75%. Here, the most promising organization of events for bioremediation. However, because of the small margin of filamentous algae (15 tons) carrying out bioremediation is ineffective.

Keywords: filamentous algae, bioremediation, heavy metals, Lake Kenon

Исследования, проводимые в России и за рубежом, рассматривают разные аспекты воздействия предприятий теплоэнергетики на окружающую среду, в том числе выбросы в атмосферу [15; и др.], последствия теплового загрязнения водоемов [10; и др.]. В Забайкальском крае воздействием тепловых электрических центральных (ТЭЦ) на окружающую среду занимался ряд исследователей, по результатам работ которых опубликованы статьи и монографии [2; 8; 9; 11; 12]. Авторами установлены основные направления трансформации водных экосистем под влиянием сбросов, в том числе и тепла, как в наливном водоеме-охладителе (Харанорская ГРЭС), так и в естественном водоеме оз. Кенон, воды которого используются для охлаждения турбин ТЭЦ 1.

Валовые выбросы от предприятий теплоэнергетики являются мощными источниками загрязнения среды металлами. В процессе сжигания угля происходит концентрирование многих металлов в золе и шлаках. Поэтому гидрозолошлакоотстойники (ГЗШО) являются местом накопления тяжелых металлов (ТМ), которые проникают сквозь стенки дамб и ложе [6] и загрязняют естественные водоемы.

В последние десятилетия в Забайкальском крае проводятся биогеохимические исследования гидробионтов [3–5]. В результате исследований выявлено, что наибольшие

содержания ТМ характерны для гидробионтов из хвост хранилищ горнодобывающих предприятий [13] и ГЗШО [14]. Поиск путей снижения количества ТМ в загрязняемых экосистемах, является актуальной задачей. Целью работы было оценить массу ТМ, накопленных нитчатыми водорослями в оз. Кенон для рассмотрения вопроса о целесообразности использования нитчаток как объекта биоремедиации. Это необходимо для разработки рекомендаций по снижению экологического ущерба от загрязнения ТМ.

Материалы и методы исследования

Материал собран в 2011–2014 гг. Нами исследовались нитчатые водоросли, распространенные в водоеме преимущественно до глубины в 1 м. Пространственное размещение мест сбора водорослей показано на рисунке.

Сбор водорослей производился как с грунта, так и с водных растений *Potamogeton crispus* L. и *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. При количественных сборах учитывалось проективное покрытие. Количественная оценка воздушно-сухого (ВСухВ) и воздушно сырого (ВСырВ) веса проведена с использованием весов с точностью до 0,00005 г. Методика сбора и пробоподготовки макроводорослей для анализа на содержание ТМ представлена в [13]. Концентрации металлов в 2011–2013 гг. определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в лаборатории Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина (г. Хабаровск), в 2014 – ИСП-МС в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем тех-

нологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (АСИЦ ИПТМ РАН) (Московская область, г. Черноголовка). Точность измерений была проверена с помощью стандартного образца *Elodea canadensis* Michx. (1803) (SRM, EK-1, регистрационный номер КООМЕТ 0065–2008–RU). Данные обрабатывали статистически с использованием STATISTICA 10 для Windows (Copyright © StatSoft, Inc).

стве *Chaetophora lobata* Schrank, *Mougeotia* sp. и *Tribonema* sp. особенно в устьевой части р. Кадалинка и *U. zonata* на участке подкачки воды из р. Ингода указывает на улучшение качества воды в водоеме.

В 2014 г. в месте поступления закачиваемых из р. Ингода вод отмечалось обильное

Рис. 1. Схема размещения участков сбора нитчатых водорослей в оз. Кенон: I – район ТЭЦ 1; II – р-он КСК – Ивановская; III – залив; IV – р-он подкачки из р. Ингода

Результаты исследования и их обсуждение

Видовой состав нитчатых водорослей в оз. Кенон небогат [14]. Наибольшее разнообразие по составу и фитомассе отмечается в районе сброса термальных вод ТЭЦ 1, где на участке незамерзающей полыньи вегетация нитчатых водорослей происходит круглогодично. Распространение нитчатых водорослей по акватории и фитомасса крайне неравномерное [4]. Водоросли преимущественно развиваются среди высшей водной растительности глубинах 0,1–1,5 м, реже образуют собственные скопления (*Cl. fracta*, *Spirogyra* sp., *ster.*, *U. zonata*), достаточные для проведения геохимических исследований.

Фитомасса и плотность скоплений нитчатых водорослей зависит от величины биогенного питания. Установлено, что уменьшение фитомассы нитчаток в сбросном канале произошло после закрытия рыбного садкового хозяйства на подводящем канале ТЭЦ 1. Сукцессионный ряд в сбросном канале за 1980–1990–2000–2010–2015 гг. имеет следующий вид: *Mougeotia* sp. – *Cl. fracta* – *Cl. fracta* + *Spirogyra* sp., *ster.* – *Cl. fracta* – *Cl. fracta*. Появление в видовом со-

цветении *Spirogyra* sp., которая сменила *U. zonata*, что указывает на ухудшение качества поступающих вод из р. Ингода. Причиной загрязнения являются канализационные воды пос. Кадала, сбрасываемые в р. Ингода выше водозабора. В настоящее время уровень оз. Кенон регулируется объемом закачиваемой из р. Ингода воды. Сток р. Кадалинка и руч. Застебинский из-за многолетней засухи отмечается только в периоды обильных осадков, сток дренажных вод ГЗШО, как и выпадения атмосферных осадков на акваторию водоема также не велики. Таким образом, видовой состав и количество нитчатых водорослей в оз. Кенон определяются величиной биогенной нагрузки на водоем.

Общая фитомасса нитчатых водорослей в водоеме в период открытой воды составляет 27,8 тонн, при этом фитомасса нитчатых водорослей на участке I составляет 15,7 тонн (табл. 1). Содержание ТМ в нитчатых водорослях показано в табл. 2. Наибольшие концентрации отмечены в *C. fracta* на станции 2 и 4, что обусловлено влиянием фильтрационных вод ГЗШО, разгружающихся в р. Кадалинка, в канал сброса подогретых вод и залив.

Таблица 1
Фитомасса (г/м²) и масса (кг) нитчатых водорослей по участкам в оз. Кенон

Участок	Станция	S, м ²	Вид	Фитомасса		Масса	
				ВСырВ	ВСырВ	ВСырВ	ВСырВ
I	1	4082	<i>C. fracta</i>	38,2	24,0	155,93	97,97
	2	11247	<i>C. fracta</i>	1021,9	645,6	11493,31	7261,06
	3	901	<i>C. fracta</i>	4544,0	2904,0	4094,14	2616,50
II	4	25006	<i>C. fracta</i>	84,7	55,2	1959,20	1276,83
	5	5903	<i>C. fracta</i>	65,3	42,556	385,47	251,21
	6	8422	<i>C. fracta</i>	60,1	39,168	506,16	329,87
III	7	13839	<i>C. fracta</i>	174,7	106,6	2417,67	1475,24
IV	8	8579	<i>C. fracta</i>	25	16,3	214,48	139,83
	9	870	<i>U. zonata</i>	0,56	0,143	0,49	0,12
	9	870	<i>Mougeotia sp. ster.</i>	0,127	0,025	0,11	0,02

Сравнение данных по *C. fracta* с полученными ранее [4; 5], показало, что на участке литорали в районе ТЭЦ 1 концентрации рассматриваемых элементов, кроме Hg, в 2014 году в сравнении с 2011 годом снизились в диапазоне от 2 до 22,5 раз. По Hg произошло повышение в 2,5 раза. Для станции №2 содержание Cr, As, Hg в 2011 году было выше 2,5 – 5,7 раз, чем в 2014 году, для Cd сохранилось на прежнем уровне, для Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo в пробах 2014 года содержания выше, чем в 2011 от 2 до 16 раз. Сравнение концентраций токсичных элементов в *C. fracta* с известными для этого вида из других водных объектов

[7] указывает на загрязнение участка водоема Zn, Cu, Cd.

Способность нитчатых водорослей к высокому и избыточному накоплению элементов давно используется для доочистки сточных вод [1]2). Нами проведены расчеты накопления ТМ в макроводорослях в экосистеме оз. Кенон (табл. 2, 3).

Вклад разных элементов в общую массу ТМ неодинаков. Так доля Fe составляет 51 %, а в совокупности с Mn 75,5 %. Остальные элементы распределяются следующим образом (в %): Sr 14,1, Zn 7,3, Cu 2,0, As, Pb и Ni – десятые доли, Cr, Co, Mo – сотые, Cd и Hg – тысячные.

Таблица 2
Содержание ТМ (мг/кг, сухой вес) в макроводорослях в августе 2014 г.

Вид	Станция	Элементы												
		Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Hg	Pb
<i>C. fracta</i>	2	1,2	183,0	928,9	0,4	2,3	43,6	163,9	8,7	268,9	0,1	0,2	0,05	5,4
	4	1,4	1928,0	1680,0	2,0	9,6	54,9	114,7	9,3	373,0	1,5	0,1	0,05	4,3
	8	0,7	96,0	1432,0	0,5	1,9	19,9	333,9	9,8	273,0	0,6	0,1	0,05	1,5
	7	2,5	817,6	968,6	0,7	2,4	10,9	94,4	11,7	334,4	0,2	0,1	0,02	4,8
<i>U. zonata</i>	9	2,9	98,0	3297,0	1,1	2,3	25,6	247,0	7,5	171,0	0,2	0,1	0,03	4,2
<i>Mougeotia sp. ster.</i>	9	0,3	298,0	361,0	0,7	0,9	18,1	71,1	7,8	233,0	0,8	0,1	0,03	1,5

Примечание. н.д. – нет данных.

Таблица 3

Общая масса ТМ в нитчатых водорослях (ВСухВ) на разных участках оз. Кенон

Уча- сток	Элементы, г												
	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Hg	Pb
I	11,97	1825,52	9266,27	3,99	22,94	434,93	1634,99	86,79	2682,42	1,00	2,00	0,52	53,87
II	2,75	3781,60	3295,17	3,92	18,83	107,68	224,97	18,24	731,61	2,94	0,20	0,10	8,43
III	0,11	14,67	218,96	0,08	0,29	3,04	50,99	1,50	41,69	0,09	0,02	0,01	0,23
IV	3,69	1206,15	1428,91	1,03	3,54	16,08	139,26	17,26	493,32	0,30	0,15	0,03	7,08
Всего	18,5	6827,9	14209,3	9,0	45,6	561,7	2050,2	123,8	3949,0	4,3	2,4	0,7	69,6

Ограниченная площадь распространения (0,5% от общей площади водоема), не позволяет в настоящих условиях рассматривать нитчатые водоросли в оз. Кенон как самостоятельный объект биоремедиации, способный существенно уменьшить содержание ТМ в экосистеме водоема. Тем не менее, возможно совместное удаление нитчатых водорослей с высшей водной растительностью. В связи с тем, что фитомасса нитчатых водорослей на I участке составляет 74% от общей их массы в водоеме, считаем наиболее перспективным в проведении биоремедиации на I участке. Здесь только у Mo, Mn, Co масса ниже 50% от всего накопленного в водорослях, а для таких элементов как Cu, Zn, Cd, Hg, Pb доля в общем количестве накопленных металлов превышает 75% (табл. 3).

Выводы

Таким образом, нами выявлены высокие концентрации ТМ в сухой массе нитчатых водорослей из оз. Кенон. Наибольшие концентрации отмечены в *S. fracta* на станции 2 и 4, что обусловлено влиянием фильтрационных вод ГЗШО, разгружающихся в р. Кадалинка, в канал сброса подогретых вод и залив.

На участке сброса теплых вод с ТЭЦ 1 (участок I) отмечается наибольшая фитомасса нитчатых водорослей (15,7 тонн в ВСухВ), что составляет 74% от общей их массы в водоеме. Именно здесь наиболее перспективна организация мероприятий по биоремедиации. Однако вследствие незначительного запаса нитчатых водорослей и их ограниченного распространения в водоеме проведение биоремедиации, направленной на снижение поступления ТМ, без проведения специальных мероприятий малоэффективно.

Работа выполнена в рамках проекта ФНИИ IX.137.1.1. при финансовой поддержке проекта РФФИ № 14-05-98013 p_Сибирь_a.

Список литературы

1. Величко И.М. Экологическая физиология зеленых нитчатых водорослей. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 117 с.
2. Водоем-охладитель Харанорской ГРЭС и его жизнь. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 192 с.
3. Клишко О.К., Авдеев Д.В., Зазулина В.Е., Борзенко С.В. Роль хирономид (Diptera: Chironomidae) в биологической миграции химических элементов в экосистеме антропогенных водоемов // Чтения памяти В.Я. Леванидова. – Вып. 3. – Владивосток, 2005. – С. 360–367.
4. Куклин А.П. Нитчатые водоросли озера Кенон: разнообразие, индикация качества вод // Вода: химия и экология. – 2014. – №8. – С. 49–54.
5. Куклин А.П. Содержание тяжелых металлов в макроводорослях водоемов и водотоков Забайкалья // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: труды IV Всерос. симп. и X Всерос. чтения памяти акад. А.Е. Ферсмана. – Чита, Поиск, 2012. – С. 58–60.
6. Матафонов П.В., Замана Л.В., Куклин А.П. Бентосные сообщества в экосистеме технического водоема золотавала (по Читинской ТЭЦ 1) // Научные основы сохранения водосборных бассейнов: междисциплинарные подходы к управлению природными ресурсами: тезисы межд. конф. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2004. – С. 163–164.
7. Никаноров А.М., Жулидов А.В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 312 с.
8. Оглы З. П. К вопросу эвтрофирования озера Кенон. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2008. – № 2. – С. 93–100.
9. Термический режим и биология озера Кенон // Записки Заб. фил. геогр. общ-ва СССР. – Чита, 1972. – 83 с.
10. Хлынова С. И. Оценка влияния сбросных вод Назаровской ГРЭС на экосистему реки Чулым: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. – Астрахань, 2004. – 24 с.
11. Шишкин Б.А., Локоть Л.И. Режим биогенных элементов и продукция фитопланктона озера Кенон // Ученые записки Заб. фил. геогр. общ-ва СССР. Лимнологические исследования в Забайкалье. – Чита, 1973. – С. 28–48.
12. Экология городского водоема. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 1998. – 260 с.
13. Kuklin A.P., Matafonov P.V. Background concentrations of heavy metals in benthos from transboundary rivers of the Transbaikalia region, Russia // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 2014. – Т. 92. – № 2. – С. 137–142.
14. Kuklin A.P., Tsybekmitova G.T., Gorkacheva E.P., Bazarova B.B., Afonin A.V. The ecosystem of lake Kenon: past and present (Transbaikalia territory, Russia) // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. – 2016. – Т. 34. – № 3. – С. 507–516.
15. Nilsson S., Blauberg K., Samarskaia E., Kharuk V. Pollution stress of Siberian forests. Air Pollution in the Ural Mountains. NATO ASI Series. – 1998. – Vol. 40. – P. 30–54.