

## **НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ФИТОПЛАНКТОНОМ В ОЗЕРЕ БОЛЬШОЕ МИАССОВО (ЮЖНЫЙ УРАЛ)**

© 2014 Л.В. Снитко, А.Г. Рогозин, С.В. Гаврилкина

Ильменский государственный заповедник им. В.И. Ленина Уральского отделения РАН

Поступила 03.12.2013

Статья посвящена биоаккумуляции микроэлементов фитопланктоном пресноводного озера на Южном Урале. Обнаружена статистически значимая зависимость распределения тяжелых металлов Fe, Cd, Zn от общей биомассы фитопланктона и доминирующей группы видов *Synophyta*.

**Ключевые слова:** фитопланктон, синезеленые водоросли, биомасса, тяжелые металлы, железо, марганец, цинк, кадмий, абсорбция, адсорбция.

Присутствие тяжелых металлов (ТМ) в природных водах обусловлено геологическими предпосылками и антропогенным загрязнением окружающей среды. Котловина водоема является сложным геологическим объектом, представленным набором пород от ультраосновных до кислых и карбонатных. Геохимический состав горных пород оказывает влияние на состав воды за счет процессов выщелачивания и растворения соединений ТМ. Водоем также обогащается ТМ в результате аэриального переноса от удаленных локальных источников. Проведенные нами исследования [12] показали существенную роль эмиссии в атмосферу ТМ в формирование загрязнения озерных вод в условиях региона с развитой металлургической промышленностью. В гидрокарбонатных водах озера Большое Миассово миграционная способность ТМ увеличена.

Фитопланктон, как совокупность автотрофных организмов с минеральным питанием, включает доступные формы ТМ в биохимические процессы. Внутриклеточная абсорбция ТМ и осаждение их после отмирания организмов играют значительную роль в круговороте вещества в аквальных экосистемах благодаря высокой продуктивности водорослей. Скорость естественного отмирания клеток фитопланктона составляет от 8% (*Chlorophyta*) до 31% (*Bacillariophyta*) в сутки [4]. Не менее существенна роль адсорбции: изменяя в процессе фотосинтеза рН воды и окислительно-восстановительный потенциал, микроводоросли способствуют переходу ТМ из ионной формы в минеральную [9] и адсорбируют соединения металлов на клеточной оболочке или в колониальной слизи.

Взаимодействие водорослей с ТМ в основном исследовано с позиций токсического воздействия металлов на популяционные и морфологические характеристики [15, 17]. Многочисленные эксперименты «доза-эффект» [1, 3, 10, 14, 16] показывают, что потребности разных групп и видов водорослей в различных ТМ неодинаковы, при увеличении доз происходит усиленное отмирание клеток. Экспериментальные работы в лабораторных условиях не дают полной картины сложных системных откликов, которые присутствуют в условиях природных экосистем. Исследования природных ценозов, известные для почвенных водорослей [5, 6, 8, 11], показывают изменения их морфологических и популяционных характеристик и фиксируют некоторые пороговые для вегетации значения ТМ.

Целью нашего исследования была оценка накопления тяжелых металлов биомассой фитопланктона в природном водоеме.

### **ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Для статистического анализа накопления ТМ фитопланктоном выполнен трехгодичный цикл исследований фитопланктона 2007-2009 гг. в природном водоеме в условиях фонового загрязнения ТМ. В качестве объекта исследований выбрано озеро Большое Миассово, термически стратифицированное с водой гидрокарбонатного класса, нейтрально-слабощелочной средой и минерализацией 163-240 мг/л.

Одновременный отбор фитопланктонных и гидрохимических проб воды выполняли батометром в безледный период методом послонного фракционного лова от поверхности до дна 25 м, чтобы в выборке для статистического анализа присутствовали краевые значения исследуемых параметров. Всего отобрано и обработано для статистического анализа 98 проб. Таксономическое определение видов водорослей проводили по общепринятой систематической литературе, количественный учет выполняли в счетной камере объемом 0,01 мл. Биомассу определяли расчет-

---

*Снитко Лариса Вячеславовна*, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, lvs223@yandex.ru, snitkol@ilmeny.ac.ru; *Рогозин Александр Генрихович*, кандидат биологических наук, руководитель биологического отдела, rogozin57@gmail.com; *Гаврилкина Светлана Викторовна*, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, gidro@ilmeny.ac.ru

ным методом, приравнивая форму клеток водорослей к геометрическим фигурам и считая удельный вес равным единице. Одновременно в пробах определяли концентрации Zn, Cu, Pb, Cd, Fe, Mn по ГОСТ Р 51309–99 методом атомно-абсорбционной спектроскопии (Perkin-Elmer-3110), анализы выполнены в объединенной химико-аналитической лаборатории Института минералогии УрО РАН Ильменского заповедника УрО РАН Лапшиной Л.Б. Пробы воды при подготовке к анализу не отделяли от фитопланктонных организмов, находящихся в ней. Для статистического анализа выбрали Cyanophyta, поскольку максимальные летние биомассы планктона в оз. Б. Миассово определяются синезелеными водорослями и при этом можно пренебречь вкладом зоопланктона. Количественная обработка данных выполнена с помощью табличного процессора Excel и программных пакетов Statistica 6.0.2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистические методы исследования позволяют выявить сопряженность величин концентраций ТМ с развитием водорослевой биомассы.

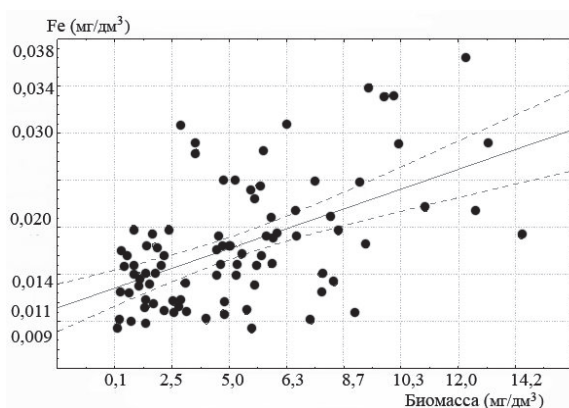
Физический смысл связи между величиной биомассы фитопланктона в воде и концентрацией ТМ в воде обоснован опытами с культурами водорослей [10, 14, 16]. Прямую корреляцию можно интерпретировать как аккумуляцию ТМ, при этом разделить составляющую адсорбции с видоспецифичной абсорбцией невозможно. Исключение составляет цинк, который присутствует в природных водоемах преимущественно в ионной форме и потому не адсорбируется слизистыми оболочками в виде нерастворимых соединений, а поглощается клетками микроводорослей.

Поскольку число наших наблюдений приближается к 100, допустимо применение параметрической статистики для анализа связи биомассы фитопланктона и содержания ТМ [2]. Мы применили попарные и частные корреляции Пирсона предварительно исключив из выборки выбросы (табл. 1).

**Таблица 1.** Корреляция Пирсона общей биомассы фитопланктона и концентраций ТМ; отмечены значимые корреляции из числа наблюдений  $N = 86$

Переменные	Биомасса	Fe	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
Биомасса	1,00	<b>0,53</b>	0,12	<b>0,29</b>	0,02	-0,02	<b>0,26</b>
Fe	<b>0,000</b>	1,00	0,14	<b>0,36</b>	<b>0,29</b>	-0,01	-0,03
Cu	0,506	0,556	1,00	<b>0,28</b>	-0,05	0,02	0,05
Zn	<b>0,028</b>	<b>0,017</b>	<b>0,008</b>	1,00	0,07	0,07	-0,02
Mn	0,406	<b>0,000</b>	0,813	0,736	1,00	-0,06	-0,04
Pb	0,552	0,865	0,831	0,507	0,720	1,00	0,03
Cd	<b>0,007</b>	0,582	0,432	0,729	0,429	0,700	1,00

Примечание: в нижней части таблицы под диагональю даны значения уровней р-вероятностей соответствующих корреляций, выделены значимые  $p \leq 0,05$



**Рис. 1.** Диаграмма рассеяния значений биомассы фитопланктона в зависимости от концентраций железа в воде оз. Б. Миассово 2007-2009 гг. в период открытой воды

Наибольшей является сила связи биомассы фитопланктона с концентрациями железа. Объясняется это может присутствием в значимом коли-

честве диатомовых водорослей (Bacillariophyta), активно потребляющих Fe на протяжении всего периода открытой воды и обычно имеющих максимумы биомассы в весенний и осенний периоды в исследуемом водоеме [13]. Диаграмма рассеяния для выявленной зависимости показывает, что расчетные значения отличаются от наблюдаемых и не входят в доверительный интервал, но тенденция увеличения концентраций с ростом биомассы хорошо выражена (рис. 1).

Далеко от доверительного интервала попадают величины концентраций ТМ при биомассе фитопланктона выше мезотрофного уровня –  $2 \text{ мг/дм}^3$ . Мы посчитали такой разброс следствием полидоминантности фитопланктона в мезотрофном озере Б. Миассово, когда разные группы водорослей аккумулируют ТМ в разной степени.

Максимумы биомассы фитопланктона в исследуемый периоды были обусловлены синезелеными водорослями, хотя наибольшую ценогиче-

скую значимость в озере Б. Миассово за счет высокой встречаемости имеют золотистые и диатомовые водоросли [13]. Комплекс Cyanophyta, определяющий высокую биомассу фитопланктона с начала лета до поздней осени, состоит из видов *Anabaena flos-aquae* (Lyngb.) Bréb., *A. hassalii* (Kütz.) Wittr., *A. spiroides* Kleb., в отдельные годы достигали большого развития *Aphanizomenon flos-aquae* (Lemmerm.) Ralfs, *Plankthotrix agardhii* (Gomont) Anagn. et Komárek. Синезеленая водоросль с коротким периодом вегетации *Gloeotrichia echinulata* (J. S. Smith) P. Richt. определяла биомассу фитопланктона озера от полутора до двух месяцев. Анализ зависимости содержания ТМ и биомассы Cyanophyta проведен с помощью непараметрической корреляции Спирмена (N=29, выбросы биомасс не убирала). Обнаружены значимые положительные корреляции на уровне  $p < 0,05$ : наиболее сильная с Fe – 0,699 (рис. 2), а также с Cd – 0,369 и Zn – 0,300.

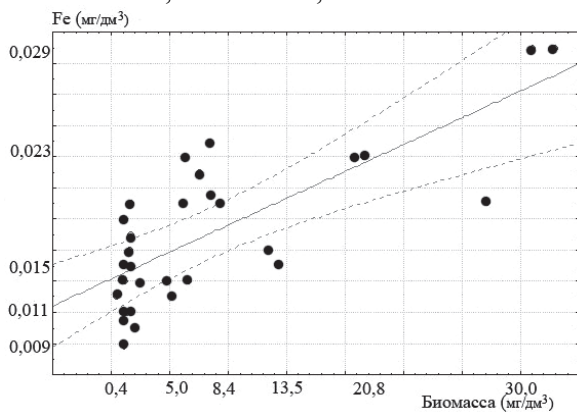


Рис. 2. Диаграмма рассеяния биомассы летне-осеннего комплекса Cyanophyta в зависимости от концентраций железа в воде оз. Б. Миассово 2007-2009 гг.

Диаграммы рассеяния показывают хорошее попадание в доверительный интервал наблюдений при максимальных значениях биомасс Cyanophyta свыше 20 мг/дм<sup>3</sup>. Из литературы известна невысокая потребность организмов Cyanophyta в железе [14]: в культурах водорослей железо поглощается этой группой в сравнительно небольших дозах. Проведенные опыты по определению ТМ в нагонных массах синезеленых водорослей в периоды их гиперразвития в озере Б. Миассово обнаружили накопление железа до 2550 мг/кг. Поскольку его накопление может быть обусловлено адсорбированием на поверхности клеток и в колониальной слизи. Вероятно, процесс адсорбции происходит при вертикальных суточных миграциях, свойственных синезеленым водорослям: нерастворимые соединения железа, оседая на дно, попадают в вязкую колониальную слизь. Обнаруженные высокие накопления марганца (3200 мг/кг) в нагонных массах фитопланктона, возможно, также связано с вертикальными мигра-

циями массовых видов Cyanophyta и адсорбцией его нерастворимых окислов. В биомассе Cyanophyta обнаружили преимущественное накопление марганца по сравнению с железом, хотя среднее в водоемах соотношение Mn : Fe составляет 1/2 – 1/3 [14]. Таким образом, хорошее попадание в доверительный интервал (рис. 2) найвысших концентраций железа при максимальных значениях биомасс Cyanophyta согласуется с выводом об аккумуляции железа видами именно этой таксономической группы путем адсорбции на обильной колониальной слизи.

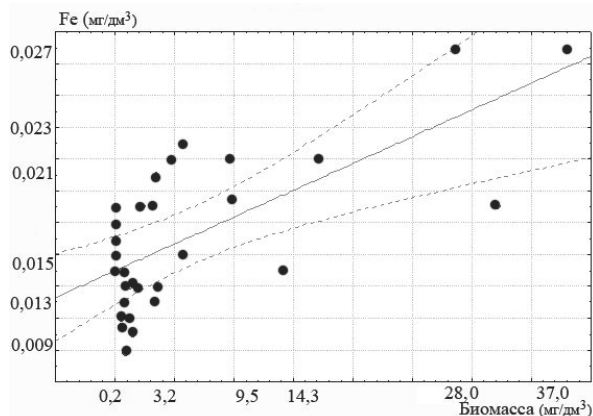


Рис. 3. Диаграмма рассеяния биомассы *Gloeotrichia echinulata* (Cyanophyta) в зависимости от концентраций железа в воде оз. Б. Миассово 2007-2009 гг.

Для выявления аккумуляции ТМ наиболее массовым видом *Gloeotrichia echinulata* (Cyanophyta) применена корреляция Спирмена (N=30). Отмечена значимая положительная корреляция на уровне  $p < 0,05$  с Fe – 0,516, Cd – 0,523, и менее сильная зависимость с Zn – 0,258, то есть валовые концентрации данных ТМ в воде растут с увеличением развития глеотрихии (рис. 3).

Статистическая зависимость концентрирования цинка массовым видом глеотрихией невысока (рис. 4): выбросы биомассы порядка 20 мг/дм<sup>3</sup> усиливают корреляцию и придают ей значимость. Данный факт и многолетние наблюдения за массовым развитием *G. echinulata* позволяют предположить, что цинк становится необходимым и активно потребляется водорослью при массовом спорообразовании внутри колоний, когда биомасса резко нарастает. При дальнейшем нарастании биомассы вида в терминальных стадиях вегетации колонии приобретают подушковидную форму и происходит процесс разложения, вероятно, не сопровождающийся усиленной абсорбцией данного ТМ.

Определение содержания цинка в нагонных массах *G. echinulata* показали значения 355 мг/кг и превышает накопления других ТМ, за исключением железа и марганца. Это согласуется с известными данными: живые клетки способны на-

капливать цинк сверх того количества, которое им необходимо для метаболизма [7].

Значимой статистической зависимости развития фитопланктона от концентраций меди и свинца не обнаружено (табл. 1). В нагонных массах синезеленых водорослей концентрации меди были до 49 мг/кг, свинца до 12 мг/кг.

Выявлена положительная корреляция биомассы синезеленых водорослей с концентрацией кадмия (рис. 5).

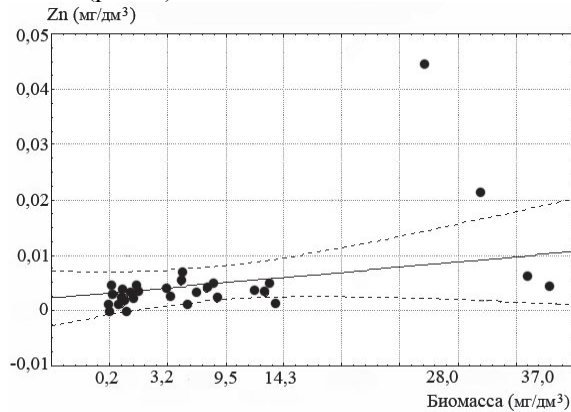


Рис. 4. Диаграмма рассеяния биомассы *Gloeotrichia echinulata* (Cyanophyta) в зависимости от концентраций цинка в воде оз. Б. Миассово 2007-2009 гг.

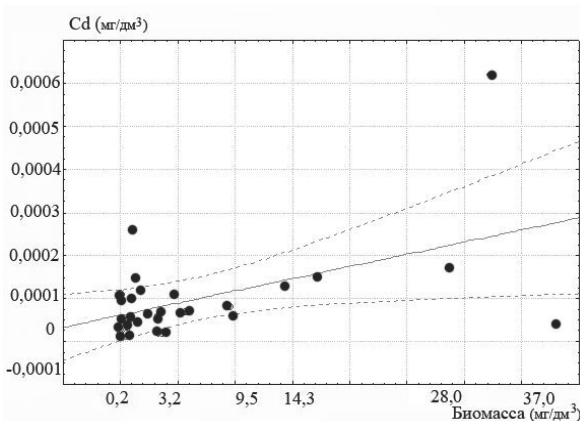


Рис. 5. Диаграмма рассеяния биомассы *Gloeotrichia echinulata* (Cyanophyta) в зависимости от концентраций кадмия в воде оз. Б. Миассово 2007-2009 гг.

Кадмий не относится к числу жизненно необходимых клетке элементов, в отличие от цинка, но, по литературным данным, активно связывается цитоплазматическими белками клеток водорослей [14], не оказывая в близких к фоновым концентрациях токсического воздействия. Данные статистического анализа показывают аккумуляцию Cd планктонной водорослью *Gloeotrichia echinulata* и, как следствие, уменьшение известного [1] отрицательного воздействия повышенных концентраций ионов данного металла на природные экосистемы.

## ВЫВОДЫ

1. Фитопланктон в наибольшей степени накапливает Fe, Zn и Cd, величина статистической зависимости снижается при высокой биомассе (выше 2 мг/дм<sup>3</sup>) из-за полидоминантности сообщества.

2. Доминирующая группа фитопланктона – Cyanophyta в наибольшей степени аккумулирует железо, которое не является физиологически необходимым в большом количестве данной группе, путем адсорбции на слизистых оболочках колоний.

3. Наиболее массовый вид водорослей *Gloeotrichia echinulata* (Cyanophyta) преимущественно аккумулирует Fe, Zn и Cd.

4. Данные по аккумуляции тяжелых металлов микроводорослями подтверждают их активное участие в седиментации ТМ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бингам Ф.Т., Коста М., Эйхенберг Э. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. М.: Мир. 1993. 368 с.
2. Боровиков В. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. С.-Пб.: Питер. 2003. 688 с.
3. Гайсина Л. А., Фазлутдинова А. И., Кабиров Р. Р. Популяционная альгология. Уфа. 2008. 152 с.
4. Елизарова В.А. Интенсивность отмирания фитопланктона в Рыбинском водохранилище // Биология внутренних вод. 2004. № 3. С. 46-51.
5. Кабиров Р. Р., Хазитова Р. Х. Изменение количественных показателей альгосинузий пойменных почв при антропогенном загрязнении // Бот. журнал. 1987. Т. 72. № 8. С. 1060-1065.
6. Кабиров Р. Р. Альгосинузии хвойных лесов в районе комбината «Североникель» (Кольский полуостров) // Лесоведение. 1997. № 3. С. 33-39.
7. Корсак М. Н. Воздействие цинка, хрома и кадмия на некоторые функциональные и структурные показатели фито- и бактериопланктона. Автореф. дис. канд. биол. наук. Москва, 1976. 25 с.
8. Кузьяхметов Г. Г. Способ оценки загрязнения почв по морфологическим показателям популяций водорослей // Почвоведение. 1993. № 8. С. 118-117.
9. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л.: Наука. 1970. 440 с.
10. Левич А. П., Максимов В. Н., Булгаков Н. Г. Теоретическая и экспериментальная экология фитопланктона: управление структурой и функциями сообществ. М.: Изд-во НИЛ. 1996. 184 с.
11. Новаковская И. В. Группировки почвенных водорослей еловых лесов подзон средней и южной тайги и их изменение под влиянием аэротехногенного загрязнения: Автореф. дис. канд. биол. наук. Сыктывкар, 2007. 19 с.
12. Розозин А. Г., Гаврилкина С. В. О причинах высокого содержания меди и цинка в водах некоторых озер Южного Урала // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 6. С. 730-736.
13. Снитыко Л. В., Розозин А. Г. К оценке структурной организации фитопланктона озера Большое Миассово (Южный Урал) // Экология. 2002. № 6. С. 426-431.
14. Чернавская Н. М. Физиологическая роль некоторых металлов в жизни водорослей // Физиология расти-

- тельных организмов и роль металлов. Под ред. Чернавской Н.М., М.: МГУ. 1989. С. 17-45.
15. *Delgado M., Garcés E., Vila M., Camp J.* Morphological variability in three populations of the dinoflagellate *Alexandrium taubori* // J. Plankton Res, 1997. т.19. № 6. P. 749-757.
16. *Hutchinson T. C.* Chromium. Cobalt // Effect of heavy metal pollution on plants. London 1981. P. 222-234.
17. *Shehata S., Bard S.* Growth response of *Scenedesmus* to different concentrations of copper, cadmium, nickel, zinc and lead // Environ Int. 1980. 4. № 5-6. P. 431-434.

## ACCUMULATION OF HEAVY METALS BY PHYTOPLANKTON IN THE LAKE BOLSHOYE MIASSOVO (SOUTH URALS)

© 2014 L.V. Snitko, A.G. Rogozin, S.V. Gavrilkina

Federal state budgetary nature protection institution science Ilmen state reserve, Ural branch of RAS

The article is devoted to bioaccumulation of trace elements phytoplankton freshwater lake in the South Urals. Found a statistically significant dependence of the distribution of heavy metals Fe, Cd, Zn of the total phytoplankton biomass and the dominant group Cyanophyta species.

**Key words:** phytoplankton, blue-green algae, biomass, heavy metals, iron, manganese, zinc, cadmium, absorption, adsorption.