

## ЦИАНОБАКТЕРИИ (CYANOBACTERIA) ВОДОЕМОВ ИМПАКТНОЙ ЗОНЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАРАБАШСКОЙ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2016 Л.В. Снитко, В.П. Снитко

Ильменский государственный заповедник, г. Миасс

Статья поступила в редакцию 20.05.2016

В статье рассмотрены изменения видового разнообразия цианобактерий по градиенту комплексной техногенной нагрузки в малых пресноводных мезотрофных водоемах лесной зоны Южного Урала, находящихся на протяжении ста лет в зоне импактного воздействия горнопромышленного техногенеза Карабашской геотехнической системы. Показано, что по мере увеличения степени кислотности, концентрации сульфат-иона и ионов тяжелых металлов Cu, Zn, Pb, Cd в планктонных ценозах происходит значительное уменьшение видового разнообразия Cyanobacteria. При повышении уровня комплексного техногенного воздействия на водоем происходит резкое уменьшение количества видов всех таксономических порядков Chroococcales, Oscillatoriales, Nostocales, ведущие рода цианобактерий меняют структуру представительства в фитопланктоне. Наиболее устойчивыми к токсическому воздействию медеплавильной промышленности оказались два планктонных вида цианобактерий: *Planktolyngbya limnetica*, *Limnothrix planctonica*, вегетирующие в массовом количестве в наиболее загрязняемых водоемах импактной зоны геотехнической системы.

**Ключевые слова:** цианобактерии, видовое разнообразие, импактная, буферная и фоновая зоны воздействия техногенеза, Карабашская геотехническая система.

Загрязнение природной среды промышленными выбросами приводит к изменению биотической структуры водных сообществ. Для выявления реакции первичного звена биоты – автотрофных организмов, наиболее быстро реагирующих на антропогенное воздействие, необходим флористический и ценотический анализ различных групп планктонных водорослей. Рост разнообразия цианобактерий (Cyanobacteria, Cyanoprokaryota) в фитопланктоне в многолетней динамике отмечается в большинстве пресноводных водоемов региона [1], известно, что разнообразие этой группы организмов увеличивается с ростом трофии вод [2]. Уменьшение количества видов при воздействии техногенных загрязнений отмечено в различных альгоценозах [3, 4, 5, 6].

Цель выполненной работы стало выявление изменений видового разнообразия цианобактерий в экстремальных условиях воздействия техногенного загрязнения по градиенту acidification и нагрузки тяжелых металлов.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Загрязнение аквальных экосистем Карабашской геотехнической системы (ГТС) происходит техногенными кислыми водами-рассолами, образованными окислением сульфидов в отходах добычи и обогащения руд. Зона импактного воз-

действия ГТС расширяется аэральным переносом загрязнений: при прохождении дождей через шлейф газопылевых выбросов медеплавильного производства. Выпадают кислые осадки с высоким содержанием сульфат-иона (до 170 мг/л) и тяжелых металлов (ТМ) – меди, цинка, свинца, кадмия. Обильные осадки сульфатно-хлоридного кальциевого типа с преобладанием в катионной части тяжелых металлов и повышенной минерализацией выпадают на окрестных территориях заповедных Ильменских гор, где распространены гидрокарбонатные нейтральные ультрапресные поверхностные воды и аквальные экосистемы. В 50 км от ГТС в фоновой зоне загрязнения наблюдаются низкоминерализованные осадки гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридного кальциево-натриево-аммонийного типа [7]. На территории воздействия ГТС расположен ряд малых мелководных водоемов – прудов и озер, которые располагаются в градиенте изменения кислотности, сульфат- и гидрокарбонат-иона, концентраций металлов.

Материалом для работы послужили пробы, собранные на 7 сходных по морфометрическим показателям водоемах зоны воздействия ГТС: прудах Карабашском, Богородском и озере Серебры в зоне импактного воздействия, озерах Барахан и Уфимское в буферной зоне, озерах Сириккуль и Карматкуль в фоновой зоне Ильменского заповедника. Принадлежность аквальных экосистем к зоне загрязнений определена в соответствии с выполненной классификацией природно-техногенных вод ГТС [8] по уровню pH, содержанию сульфат-иона и концентрации ТМ (Cu, Zn, Pb, Cd). Все водоемы расположены в лесной зоне восточного макросклона Южного

Снитко Лариса Вячеславовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник биологического отдела. E-mail: lvs223@yandex.ru

Снитко Владимир Петрович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник биологического отдела. E-mail: snitko896@yandex.ru

Урала близ водораздела на высотах над уровнем моря 330–470 м, принадлежат Тоболо-Исетскому (Обскому) бассейну и Волго-Камскому (оз. Уфимское). Водоемы проточно-сточные: естественные озера, как и пруды, имеют небольшие плотины в месте вытекания водотоков, построенные в период горнопромышленного освоения Урала свыше 100 лет назад. Водоемы относятся к малым, площадь акватории от 0,6 до 1,9 км<sup>2</sup>, мелководным с максимальной глубиной 5,8 м. Водное питание озер осуществляется за счет поверхностного притока с водосборов, подземных грунтовых вод и атмосферных осадков.

Выпадение высокоминерализованных осадков и техногенных рассолов из поверхностного и подземного стока приводит к неустойчивому гидрохимическому режиму водоемов. В водоемах зоны импактного воздействия (оз. Серебры) зафиксированы поровые воды в донных осадках с рН 3,0–3,5 и концентрациями ТМ в сотни тысяч раз превышающие нормативные предельно допустимые концентрации Cu, Zn, Pb, Cd [7, 9]. Поверхностные водотоки несут различные по составу воды в водоемы, где они постоянно смешиваются: ручей Рыжий – ультракислые высокометалльные минерализованные (рН 2,8, удельная электропроводность 3710  $\mu\text{S}/\text{см}$ ), р. Серебрянка – нейтральные высокометалльные (рН 7,4, удельная электропроводность 956  $\mu\text{S}/\text{см}$ ), а также большое количество растворенных форм ТМ и минеральной взвеси [7, 9]. Природные

водотоки (ручьи, верхнее течение р. Сак-Элга) несут нейтральные пресные воды. В водоемах ГТС и буферной зоны при смешении техногенных и природных вод наблюдаются устойчивые повышенные концентрации ТМ, превышающие ПДК в десятки и сотни раз, уменьшающиеся от импактной зоны к фоновой. Стоки Карабашской ГТС впадают в реку Миасс и непосредственно в верхний створ Аргазинского водохранилища, оказывая существенное влияние на его водную биоту [10]. Все поверхностные воды ГТС и буферно-импактной зоны характеризуются высоким редокс-потенциалом (450–545 мВ).

Отбор проб фитопланктона осуществляли батометром Паталаса объемом 1 л в периоды открытой воды с мая по октябрь 2010–2013 гг. ежемесячно, летом и осенью 2009 и 2014 г., подледный период в 2015 г. Пробы концентрировали с помощью мембранных фильтров с размером пор 1–2 мкм, применяли фильтрацию через полиамидное сито размером пор 14 мкм (качественные пробы). Фиксировали пробы раствором Люголя с добавлением ледяной уксусной кислоты. Современные номенклатурно-таксономические понятия о цианобактериях представлены согласно J. Komárek, K. Anagnostidis [11, 12, 13].

При отборе проб фитопланктона брали воду на гидрохимический анализ, чтобы отразить конкретные условия существования планктонного сообщества в неустойчивых зонах смешения вод ГТС, некоторые показатели приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Гидрохимические характеристики водоемов импактной, буферной и фоновой зоны Карабашской ГТС

Водоем	Карабашский пруд	Богородский пруд	озеро Серебры	озеро Барахтан	озеро Уфимское	озеро Кармакуль	озеро Сириккуль
Показатели	Импактная импакта			Буферная зона		Фоновая зона	
рН	6,2-7,2	5,3-7,0	3,5-7,1	6,1-7,2	6,2-6,9	7,0-8,0	7,4-9,4
Цветность, ° Pt-Co	41,5	50,5	9,0-13,5	56,0-59,5	45,5	28,5-62,5	37,0-46,0
Удельная электропроводность $\mu\text{S}/\text{см}$	403	102-956 (416)	153-164	119	315	235-309	198-336
Гидрокарбонаты (мг/дм <sup>3</sup> )	54,9	31,7-57,9	33,6-37,8	19,5-29,9	21,35-61,0	86,0-134,2	73,2-164,7
Сульфаты (мг/дм <sup>3</sup> )	136,5	91,8	53,0-57,0	38,1-38,7	184,7	23,7	28,5
Фосфор общий, (мг/дм <sup>3</sup> )	0,036	0,029-0,136	0,057-0,110	0,043-0,050	0,145	0,060-0,133	0,080-0,170
Азот общий, (мг/дм <sup>3</sup> )	1,243	1,306	0,158-0,328	0,641-0,657	0,858	0,597-0,631	0,223-1,215

Водоемы разделены на три зоны (фоновую, буферную, импактную) по концентрациям тяжелых металлов, обнаружаемых в воде. Аналитические работы выполнены в Южно-Уральском центре коллективного пользования по исследованию минерального сырья (аттестат аккредитации № РОСС RU.001.514536).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По содержанию загрязняющих ТМ водоемы фоновой зоны относятся преимущественно к умеренно загрязненным, озера буферной зоны – к сильнозагрязненным, водоемы импактной зоны – вне природной классификации и отно-

сятся к техногенным. По значениям цветности воды все исследованные водоемы принадлежат к олиго-мезогумозному типу, по уровню минерализации – пресным. Прозрачность воды низка, что обусловлено высоким содержанием минеральной взвеси, и меняется в зависимости от осадков и перемешивания. Водоемы импактной зоны периодически подвержены сильной acidификации, но в целом, поверхностные слои в период открытой воды можно отнести к олиго-ацидным. Озера буферной зоны – нейтральные, фоновой зоны – нейтрально-щелочные. По уровню трофии, определяемой по содержанию общего фосфора и азота, водоемы зон воздействия ГТС относятся к мезотрофным и эвтрофным, озера

**Таблица 2.** Видовое разнообразие таксономических порядков и родов цианобактерий (Cyanoprokaryota, Cyanobacteria) в водоемах зоны воздействия Карабашской ГТС

Таксон	Водоемы						
	Карабашский пруд	Богородский пруд	озеро Серебры	озеро Барахтан	озеро Уфимское	озеро Кармакуль	озеро Сиркикуль
	Импактная зона			Буферная зона		Фоновая зона	
<b>Chroococcales</b>							
<i>Aphanothece</i> Näg.	1	0	0	2	0	2	2
<i>Rhabdoderma</i> Schmidle et Lauterb.	1	1	0	0	1	1	1
<i>Aphanocapsa</i> Näg.	0	0	1	2	0	4	5
<i>Merismopedia</i> Meyen	0	0	0	0	0	1	1
<i>Coelosphaerium</i> Näg.	0	0	0	0	0	1	1
<i>Snowella</i> Elenk.	0	0	0	0	0	3	3
<i>Woronichinia</i> Elenk.	0	0	0	0	0	3	3
<i>Gomphosphaeria</i> Kütz.	0	0	0	0	0	2	2
<i>Microcystis</i> Kütz. et Lemm.	0	0	0	0	0	5	5
<i>Chroococcus</i> Näg.	0	1	1	1	0	3	2
<b>Oscillatoriales</b>							
<i>Romeria</i> Koszwara in Geitl.	0	0	0	0	0	0	1
<i>Pseudanabaena</i> Lauterb.	0	0	0	0	0	1	1
<i>Spirulina</i> Turp.	0	0	0	0	1	1	1
<i>Limnothrix</i> Meffert	1	1	1	0	1	2	2
<i>Planktolynghya</i> Anagn. et Kom.	1	1	1	0	1	1	1
<i>Planktothrix</i> Anagn. et Kom.	0	0	0	0	0	1	1
<i>Tychonema</i> Anagn. et Kom.	0	0	0	1	0	0	1
<i>Phormidium</i> Kütz. ex Gom.	0	0	0	0	1	1	1
<i>Lyngbya</i> Agardh ex Gom.	0	0	0	0	0	1	2
<i>Oscillatoria</i> Vauch. ex Gom.	1	2	2	2	3	4	5
<b>Nostocales</b>							
<i>Anabaena</i> Bory ex Born. et Flah.	0	0	2	0	0	5	6
<i>Aphanizomenon</i> Morr. ex Born. et Flah.	0	0	1	0	0	2	2
<i>Tolypothrix</i> Kütz.	0	0	0	0	0	2	2
<b>Всего</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>46</b>	<b>51</b>

фоновой зоны в летний период по некоторым показателям достигают уровня гипертрофии.

В составе фитопланктона в зоне воздействия Карабашской ГТС за период 2009-2015 гг. выявлено 57 видов, разновидностей и форм цианобактерий. Преобладало видовое богатство исследуемой группы организмов в фоновых водоемах по отношению к импакту загрязнений – озерах Карматкуль (46) и Сириккуль (51). Наименьшее количество видов выявлено в наиболее загрязняемых тяжелыми металлами водоемах, с наибольшими показателями минерализации (удельная электропроводность 403 и 416  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) – Богородском (6) и Карабашском прудах (5).

Наибольшим числом видов в планктоценозах исследованных загрязняемых водоемов представлены рода *Aphanocapsa* (5), *Microcystis* (5) из хроококковых (Chroococcales), а также рода *Oscillatoria* (5), *Anabaena* (6). Виды *Microcystis*, *Anabaena* встречались в фоновых по отношению к загрязнению и ацидификации водоемах (табл. 2).

Исключение составляют два вида анабэн (*A. lemmermannii* P. Richt f. *lemmermannii*, *A. spiroides* Kleb. f. *spiroides*), отмеченных в небольшом количестве в оз. Серебры в поверхностных слоях, когда pH воды этого ацидифицируемого водоема составлял 7.1. В обследованных водоемах внутри зоны импакта не выражен градиент кислотности – в водоемах наблюдаются колебания уровня pH в сезоне от кислого до нейтрального, однако от импактной к фоновой зоне наблюдается увеличение и стабилизация pH на околонейтральных и нейтрально-щелочных значениях (табл. 1). Виды других наиболее представительных родов *Aphanocapsa*, *Oscillatoria* отмечены как в зонах импакта и буфера, так и в фоновых водоемах, что свидетельствует об их широком диапазоне толерантности к экологическим факторам.

Вспышки развития цианобактерий в наиболее загрязненных водоемах – Карабашском и Богородском прудах наблюдались в летний период после выпадения осадков и увеличения поверхностного стока: наблюдали значительное развитие широко распространенных массовых видов *Planktolyngbya limnetica* (Lemmerm.) Kom.-Legn. et Cronb., *Limnothrix planctonica* (Wolosz.) Meffert. В небольшом количестве в этих водоемах отмечен другой пресноводно-солонатоводный вид *Rabdoderma lineare* Schmidle et Lauterb. В подледный период во всех водоемах воздействия Карабашской ГТС понижался pH и виды Cyanoprocarota полностью отсутствовали.

Широко распространенный пресноводно-солонатоводный вид *Pseudanabaena mucicola* (Naum. et Huber-Pest.) Schwabe, развивающаяся в колониальной слизи планктонных видов *Microcystis*, *Woronichinia*, обнаружен только в водоемах фоновой зоны. Многие другие распространенные виды с широким диапазоном

экологической толерантности также обнаружены только в водоемах фоновой зоны (табл. 2).

Снижение кислотного воздействия техногенной зоны приводит к резкому увеличению видового разнообразия цианобактерий от 5-6 до 46-51 видов и внутривидовых таксонов (табл. 2). Уменьшение количества видов цианопрокариот с ростом техногенных загрязнений отмечено во многих альгоценозах в различных регионах [3, 4, 5, 14, 15].

## ВЫВОДЫ

Исследование видового разнообразия планктонных комплексов цианопрокариот в пресноводных мезотрофных олигоацидных водоемах, находящихся в зоне воздействия медеплавильной промышленности, показало, что по мере увеличения степени кислотности, концентрации сульфат-иона и тяжелометалльной нагрузки на водоем происходит значительное уменьшение видового разнообразия Cyanobacteria. При повышении уровня комплексного техногенного воздействия на водоем происходит резкое снижение количества видов всех таксономических порядков Chroococcales, Oscillatoriales, Nostocales, ведущие рода цианобактерий меняют структуру представительства в фитопланктоне.

Наиболее устойчивыми к техногенному воздействию медеплавильной промышленности оказались два вида: *Planktolyngbya limnetica*, *Limnothrix planctonica*, вегетирующие в массовом количестве в наиболее загрязняемых водоемах ГТС, куда стекают высокоминерализованные воды-рассолы, обогащенные высокими концентрациями ТМ.

Таким образом, комплексное воздействие Карабашской ГТС, выражающееся в увеличении кислотности водоемов, смены преобладания гидрокарбонат-иона на сульфат-ион, резком увеличении концентраций меди, цинка, свинца, кадмия, выражается в существенном изменении видовой структуры сообщества планктонных цианобактерий в сторону уменьшения числа видов ведущих родов, выпадении многих таксономических групп цианобактерий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снитко Л.В. Экология и сукцессии фитопланктона озер Южного Урала. Миасс: ИГЗ УрО РАН. 2009. 376 с.
2. Trifonova I.S. Phytoplankton composition and biomass structure in relation to trophic gradient in some temperate and subarctic lakes of north-western Russia and the Prebaltic // Hydrobiologia. 1998. P. 99-108.
3. Кабиров П.П., Хазипова Р.Х. Изменение количественных показателей альгосинузий пойменных почв при антропогенном загрязнении // Ботанический журнал. 1987. Т. 72. № 8. С. 1060-1065.
4. Кабиров П.П. Альгосинузии хвойных лесов в районе комбината «Североникель» (Кольский полуостров)

- // Лесоведение. 1997. № 3. С. 33-39.
5. *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.
  6. *Аминов П.Г., Снитко Л.В.* Факторы осадкообразования в водотоках Медногорской геотехнической системы (Южный Урал) // Минералогия техногенеза. 2009. Миасс: ИМин УрО РАН. 2009. С. 139-159.
  7. *Удачин В.Н., Вильямсон Б., Аминов П.Г.* Геохимия геотехнических систем Южного Урала // Естественные и технические науки. 2009. № 6. С. 298-306.
  8. *Аминов П.Г.* Биогеохимия тяжелых металлов при горнопромышленном техногенезе (на примере Карабашской геотехнической системы, Южный Урал): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2010. 17 с.
  9. *Удачин В.Н., Аминов П.Г., Филиппова К.А.* Геохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2014. 251 с.
  10. *Снитко Л.В., Снитко В.П.* Многолетние изменения фитопланктона Аргазинского водохранилища (Южный Урал) // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 2. С. 232-240.
  11. *Komárek J., Anagnostidis K.* Modern approach to the classification system of cyanophytes. 4 - Nostocales // 1989. Arch. Hydrobiol. Suppl. 82, H. 3 (Algological Studies, 56). P. 247-345.
  12. *Komárek J., Anagnostidis K.* Cyanoprocaryota. 1. Teil. Chroococcales // Süßwasserflora Mitteleuropa. 19/1. Jena: Fischer Verlag. 1998. 548 S.
  13. *Komárek J., Anagnostidis K.* Cyanoprocaryota. 2. Teil. Oscillatoriales // Süßwasserflora Mitteleuropa. 19/2. München. 2005. 759 S.
  14. *Новаковская И.В., Патова Е.Н.* Сообщества почвенных водорослей еловых лесов южной и средней тайги // Ботанический журнал. 2007. Т. 92. № 1. С. 81-95.
  15. *Шкундина Ф.Б., Асадуллина Г.Р.* Оценка экологического состояния рек на территории города на основании классификации по показателям развития планктонных водорослей, цианобактерий и биотестирования // Вода: химия и экология. 2013. № 2. С. 26-30.

#### CYANOBACTERIA IN RESERVOIRS OF THE IMPACT ZONE OF KARABASH GEOTECHNICAL SYSTEM (SOUTH URAL)

© 2016 L.V. Snitko, V.P. Snitko

Ilmen State Reserve, Miass

The article considers changes in species diversity of Cyanobacteria along a gradient of complex technogenic load in small mesotrophic freshwater reservoirs of the forest zone of the South Urals, which for over a hundred years in the area of impact of the impact of mining technogenesis Karabash geotechnical system. It is shown that with increasing degree of acidity, concentration of sulfate ions and heavy metal ions Cu, Zn, Pb, Cd in planktonic cenoses there is a significant decrease in species diversity of Cyanobacteria. When the level of the complex anthropogenic impact on the reservoir there is a sharp decrease in the number of species of all taxonomic orders Chroococcales, Oscillatoriales, Nostocales, the leading genus of cyanobacteria change the structure of representation in the phytoplankton. The most resistant to the toxic effect of copper smelting industry were two planktonic species of cyanobacteria: *Planktolyngbya limnetica*, *Limnothrix planctonica*, vegetating in large numbers in the most contaminated water bodies the impact zone of the geotechnical system.

Keywords: Cyanobacteria, species diversity, the impact, buffer background zones of influence of technogenesis, Karabash geotechnical system.