

УДК 546.4 : 546.55/59 : 579.8

ИНДИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДОЕМОВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПРИ ПОМОЩИ ЦИАНОБАКТЕРИЙ *SYNECHOCYTIS SP.*

*А.С. Богачева^{1,2}, Е.В. Полозова^{1,2}, В.В. Шилов²,
Е.В. Давыдова^{3,2}, М.А. Юдин^{2,4}, И.Н. Ключкин⁵*

¹ФГБОУ ВО Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова Минздрава России, 197022, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ГБОУ ВПО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Минздрава России, 195271, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, 194044, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный исследовательский испытательный институт военной медицины» Министерства обороны Российской Федерации, 195043, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁵Филиал ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в г. Санкт-Петербург в Московском, Фрунзенском, Пушкинском, Колпинском районах и г. Павловске, 192102, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Исследована чувствительность цианобактерий к солям тяжелых металлов при различных условиях культивирования. Показано, что снижение температуры и недостаток освещения среды обитания усиливают токсическое действие тяжелых металлов. Представлены данные о морфологических изменениях цианобактерий, вызванных токсическим влиянием тяжелых металлов. Отмечено, что цианобактерии могут быть использованы в качестве экспериментальной модели для исследования токсичности тяжёлых металлов при тестировании загрязнений водной и почвенной среды.

Ключевые слова: цианобактерии, тяжёлые металлы, электронная микроскопия, экспериментальная модель, морфологические изменения, *Synechocystis sp.*

Введение. Особую роль в оценке загрязнения водоёмов играют биологические тесты [1]. Это связано с тем, что результаты химического анализа, проводимого с помощью сложного аналитического оборудования, во многих случаях не позволяют оценить истинную опасность тех или иных загрязнителей на среду обитания, прогнозировать последствия их воздействия на живые организмы [2, 3]. Многообразные загрязняющие вещества, попадая в водную среду, могут претерпевать в ней различные превращения, усиливая при этом своё токсическое действие. По этой причине необходимо применять методы интегральной оценки качества воды. Огромную роль

при этом играют методы биотестирования. Под биотестированием понимают методы исследования, при которых о качестве среды, факторах, действующих самостоятельно или в сочетании с другими, судят по выживаемости, состоянию и поведению специально помещённых в эту среду организмов – тест-объектов [4]. Поэтому в качестве биотестов выбирают наиболее чувствительные к исследуемым загрязнителям организмы.

Уникальными представителями мира микроорганизмов являются цианобактерии. Обладая пластичным метаболизмом, они в настоящее время являются удобными модельными объектами для изучения целого ряда биологических

Богачева Александра Сергеевна (Bogacheva Alexandra Sergeevna), кандидат биологических наук, доцент кафедры токсикологии, экстремальной и водолазной медицины СЗГМУ им. И.И. Мечникова; доцент кафедры мобилизационной подготовки и медицины катастроф ПСПбГМУ им. академика И.П. Павлова, baltagy@list.ru

Полозова Елена Валентиновна (Polozova Elena Valentinovna), доктор медицинских наук, профессор кафедры мобилизационной подготовки и медицины катастроф ПСПбГМУ им. академика И.П. Павлова; профессор кафедры общей и военной гигиены СЗГМУ им. И.И. Мечникова, doctorpolozova@yandex.ru

Шилов Виктор Васильевич (Shilov Viktor Vasilyevich), доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой токсикологии, экстремальной и водолазной медицины СЗГМУ им. И.И. Мечникова, vshilov@inbox.ru

Давыдова Елена Владимировна (Davydova Elena Vladimirovna), кандидат медицинских наук, доцент кафедры военной токсикологии и медицинской защиты ВМедА им. С.М. Кирова; доцент кафедры мобилизационной подготовки и медицины катастроф ПСПбГМУ им. академика И.П. Павлова, davilena@yandex.ru

Юдин Михаил Анатольевич (Yudin Mikhail Anatolyevich), доктор медицинских наук, доцент, доцент кафедры токсикологии, экстремальной и водолазной медицины ФГБОУ ВО СЗГМУ имени И.И. Мечникова, mikhail.judin@gmail.com

Ключкин Иван Николаевич (Klyushkin Ivan Nikolaevich), и.о. заместителя главного врача Филиала ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в г. Санкт-Петербург в Московском, Фрунзенском, Пушкинском, Колпинском районах и г. Павловске, gupper10@yandex.ru

процессов [1, 5, 6]. Благодаря короткому циклу их развития можно проследить на нескольких поколениях действие вредных факторов. Одним из малоизученных, с точки зрения чувствительности к токсикантам, классом цианобактерий являются *Synechocystis sp.* [7, 8, 9].

В связи с этим в наших исследованиях проведена оценка возможности использования цианобактерий *Synechocystis sp.* в качестве тест-объекта для оценки токсичности ксенобиотиков на примере солей тяжёлых металлов.

Цель настоящей работы - сравнительная оценка чувствительности цианобактерий к солям тяжёлых металлов для возможности использования цианобактерий в качестве индикатора загрязнения водных объектов.

Материалы и методы исследования. В работе использовали штаммы цианобактерий *Synechocystis minuscula* CALU 713 из коллекции цианобактерий Санкт-Петербургского государственного университета и *Synechocystis sp.* PCC 6803 Московского государственного университета. В процессе работы исследовали влияние температуры и освещённости на чувствительность цианобактерий к токсическому действию тяжёлых металлов, оценивали морфологические и ультраструктурные изменения цианобактерий при токсическом действии солей тяжёлых металлов с помощью световой микроскопии.

Культивирование проводили в жидкой минеральной среде № 6 [3] в колбах объемом 200-250 мл при температуре 23°C и непрерывном освещении люминесцентными лампами 2300 лк. Для эксперимента использовали штамм в активной фазе роста. Посевной материал инокулировали в пробирки с 4.5 мл жидкой минеральной среды №6, разведённой в 10 раз с добавлением 4.5 мл солей металлов (AgNO_3 ; $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$; HgCOOH ; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) в различных концентрациях при различных температурных и световых условиях. Эксперимент проводили в трехкратной повторности. Подсчёт клеток в культурах осуществляли на 7-е сутки культивирования, т.к. данное время является наиболее оптимальным для воздействия тяжёлых металлов на *Synechocystis sp.* Численность клеток в культурах рассчитывали микроскопическим учётом с использованием камеры Горяева по формуле:

$$\mu = \frac{a10^3n}{hS}, \text{ где}$$

μ - численность клеток в 1 мл;

a - средняя численность клеток в большом квадрате сетки;

h - глубина камеры в мм;

S - площадь большого квадрата клетки в мм^2 ;

n - разведение исследуемой суспензии в 10 больших квадратах.

Морфометрический анализ клеток выполняли в световом микроскопе с телевизионным анализатором (МТ-9). Исследования ультраструктуры клеток *Synechocystis sp.* при воздействии различных солей тяжёлых металлов проводили с помощью электронного микроскопа. Оценивали форму и размер клеток, толщину клеточной стенки, процесс деления, изучали состояния нуклеоплазмы и цитоплазмы, а также изменения, происходящие в области нуклеоида, рибосом и тилакоидных мембран.

Результаты и обсуждение. На первом этапе проводили сравнительную оценку чувствительности цианобактерий *Synechocystis* двух штаммов (PCC 6803 И CALU 713) к токсическому действию солей тяжёлых металлов.

Токсичность солей тяжёлых металлов (AgNO_3 ; PbSO_4 ; $\text{Hg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) оценивали по их среднеэффективным концентрациям (EC_{50} , $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$).

Опыт проводили в 3-х параллельных пробах. За среднеэффективные концентрации солей тяжёлых металлов (EC_{50} , $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) – принимали концентрации, при которых количество клеток в культуре цианобактерий при инкубации с разными концентрациями солей тяжёлых металлов снижалось на 50% по сравнению с начальной плотностью культуры к определенному сроку.

Данные о токсичности солей тяжёлых металлов для *Synechocystis sp.* PCC 6803 представлены в таблице 1.

В результате проведённых исследований установлено, что для *Synechocystis sp.* PCC 6803 (на 7-е сутки) наибольшую токсичность проявляют ионы меди ($\text{LC}_{50} = 1,7 - 170 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$), а наименьшую ($\text{LC}_{50} = 700 - 1700 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) – кадмия. Однако надо отметить, что при оптимальных условиях (23°C; 2200 лк) для *Synechocystis sp.* PCC 6803 токсический эффект всех исследуемых металлов был в 10-20 раз ниже, чем при том же освещении и пониженной температуре (15°C; 2200 лк), к тому же LC_{50} превышала предельно допустимые концентрации ПДК в 10-300 раз. При низкой освещённости (500 лк; 23°C) токсичность всех металлов была значительно выше, чем при 2200 лк (почти в 10 раз – ртути и в 100 раз – меди). Таким образом, в условиях низкой освещённости ионы тяжёлых металлов проявляли более высокий токсический эффект, чем при 2200 лк.

Из полученных данных можно сделать вывод, что низкая температура и освещённость усиливают токсичность тяжёлых металлов для *Synechocystis sp.* PCC 6803.

Данные о токсичности солей тяжёлых металлов для *Synechocystis sp.* CALU 713 представлены в таблице 2.

Согласно представленным данным, для *Synechocystis sp.* CALU 713 при 23°C, независи-

Таблица 1

Летальные концентрации ионов тяжелых металлов (LC_{50} , $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) для *Synechocystis* sp. PCC. 6803 на 7-е сутки культивирования при разной температуре и освещенности

Ион металла	ПДК, $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$	LC_{50}			
		23 °С; 2200 лк	23 °С; 500 лк	15 °С; 2200 лк	15 °С; 500 лк
Cu^{2+}	1	170 ± 12,4	1,7 ± 0,3	11,9 ± 2,7	21 ± 0,9
Cd^{2+}	5	1700 ± 12,5	700 ± 5,4	80 ± 5,5	18,7 ± 0,3
Hg^{2+}	0,5	170 ± 8,5	16 ± 0,6	52 ± 1,6	71 ± 6,8
Ag^+	50	130 ± 2,5	62 ± 3,1	11,6 ± 0,5	15,8 ± 2,1

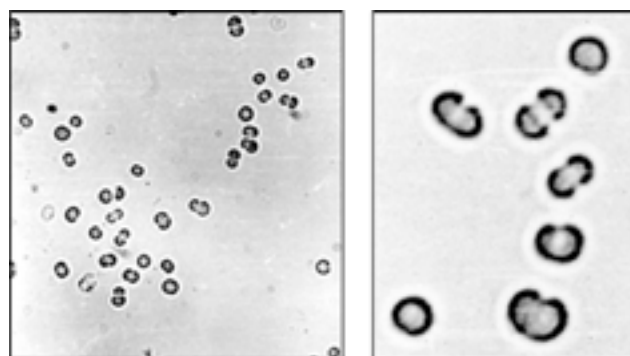
Таблица 2

Летальные концентрации ионов тяжелых металлов (LC_{50} , $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) для *Synechocystis* sp. CALU 713 на 7-е сутки культивирования в разных условиях температуры и освещенности

Ион металла	ПДК $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$	LC_{50}			
		23 °С; 2200 лк	23 °С; 500 лк	15 °С; 2200 лк	15 °С; 500 лк
Cu^{2+}	1	53 ± 4,3	30 ± 2,1	30 ± 2,1	1,5 ± 0,3
Cd^{2+}	5	2 ± 0,3	2 ± 0,35	17,5 ± 1,2	1,7 ± 0,3
Hg^{2+}	0,5	20 ± 1,6	14 ± 2,3	1,3 ± 0,28	1,7 ± 0,1
Ag^+	50	14 ± 0,1	16 ± 0,4	1,5 ± 0,1	16,6 ± 2,1

мо от освещенности, наибольшей токсичностью обладал кадмий, а наименьшей – медь. Однако при такой же температуре (23 °С) и пониженном освещении (500 лк) токсический эффект соли меди увеличился в 1,7 раза. При 15 °С и освещении 2200 лк наибольшую токсичность проявили ртуть и серебро ($\text{Hg} \geq \text{Ag} > \text{Cd} > \text{Cu}$). В условиях низкой температуры и низкой освещенности (15 °С; 500 лк) для *Synechocystis* sp. CALU 713 все металлы на протяжении опыта оказывали постоянный и высокий токсический эффект; наиболее токсичными оказались ионы меди, кадмия и ртути. Надо отметить, что при пониженных температурах и освещении 500 лк концентрации ионов кадмия, вызывающие 50% ингибиторные эффекты, превышали предельно допустимые концентрации для этих металлов в 3 раз. Таким образом, для *Synechocystis* CALU 713 при пониженной освещенности и 15 °С все испытанные металлы на протяжении опыта имели постоянный и высокий токсический эффект.

В результате проведенных исследований установлено, что цианобактерии *Synechocystis* sp. чувствительны к действию солей тяжелых металлов. Однако наиболее чувствительным к токсическому действию солей тяжелых металлов и, соответственно, наиболее подходящим для использования в токсиколого-гигиенических исследованиях

Рис. 1. Клетки *Synechocystis* sp. PCC 6803 (контроль)

является штамм *Synechocystis* sp. CALU 713.

Для этого штамма наиболее токсичными были соли ртути ($EC_{50} = 1,0 \pm 0,1 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) и свинца ($EC_{50} = 2,0 \pm 0,3 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$), а наименее – мышьяка ($EC_{50} = 14,0 \pm 0,1 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) и меди ($EC_{50} = 15,0 \pm 2,1 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$).

Для штамма CALU 713 токсичность металлов убывает в следующей последовательности ($\text{Hg} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cu}$), для штамма *Synechocystis* sp. PCC 6803 ($\text{As} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cu}$).

Для изучения основных проявлений цитотоксического действия солей тяжелых металлов исследовали их влияние на структурные изменения цианобактерий.

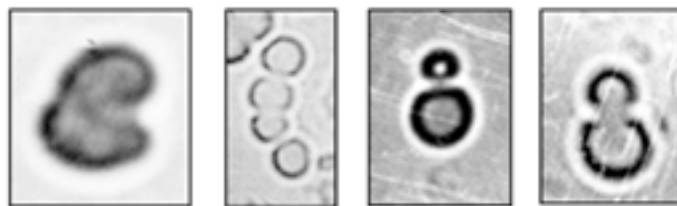


Рис. 2. Клетки *Synechocystis* sp. PCC 6803 после 7 суток культивирования в среде с ионами тяжелых металлов

Для решения этой задачи использовали световую и электронную микроскопию. Исследование проводили на 7-е сутки инкубации цианобактерий с солями тяжелых металлов. Данный срок исследования был выбран с учётом того, что к этому времени культуры цианобактерий достигают оптимальной репродуктивной активности (Гусев М.В., 2003).

В результате проведенных исследований установлено, что в контроле при оптимальных условиях культивирования (23 °С, 2200 лк) оба штамма *Synechocystis* sp. CALU 713 и PCC 6803 были представлены клетками сферической формы. Диаметр клеток 2 – 3 мкм. Клетки в культуре обычно располагались парами (рис. 1).

В присутствии солей тяжелых металлов у цианобактерий были обнаружены изменения формы и размеров клеток – наблюдали появление как относительно крупных (до 4,7 мкм), так и мелких клеток (до 1,3 мкм). Отмечено появление атипичных форм клеток, а также появление нехарактерных для данных штаммов многоклеточных цепочек (рис. 2).

Выявленные по данным световой микроскопии морфологические признаки токсического действия солей тяжелых металлов позволили предположить отражение этого эффекта и на ультраструктурном уровне.

В связи с этим были проведены исследования ультраструктуры клеток цианобактерий (на трансмиссионном электронном микроскопе *Synechocystis* sp. штаммов PCC 6803 и CALU 713 при культивировании в средах с тяжелыми металлами).

В результате проведенных исследований установлено, что в контроле у цианобактерий внутриклеточные органеллы тилакоиды расположены в концентрических рядах, наружный чехол дифференцирован слабо. Область нуклеоида зернистой структуры, четко выражена, сферической формы у штамма PCC 6803 и полигональной формы у штамма CALU 713 (рис. 3).

При культивировании цианобактерий в средах с солями тяжелых металлов были выявлены изменения ультраструктуры клеток, однотипные при действии всех исследованных солей тяжелых металлов, что позволяет предположить, что морфологические изменения имеют неспецифический характер.

Полученные результаты исследований показали, что у *Synechocystis* sp. PCC 6803 в присутствии всех исследованных металлов происходило утолщение клеточной стенки, в следствие адсорбции ионов на клеточной поверхности. Дегградация пептидогликанового слоя – характерное проявление токсического действия тяжелых металлов на штаммы *Synechocystis*. Местами он утолщается и становится менее электроноплотным. В последующем клетка теряет сферическую форму и происходит плазмолиз – отслоение клеточной стенки от протопласта. Наблюдалась деструкция тилакоидных мембран. В нуклеоплазме выявляли накопление полифосфатных гранул, по-видимому, играющих важную роль в связывании ионов металлов и их детоксикации. В результате разрушений рибосом цитоплазма теряет характерную зернистость и в ней появлялись обширные светлые участки. Нуклеоид, в норме гомоген-

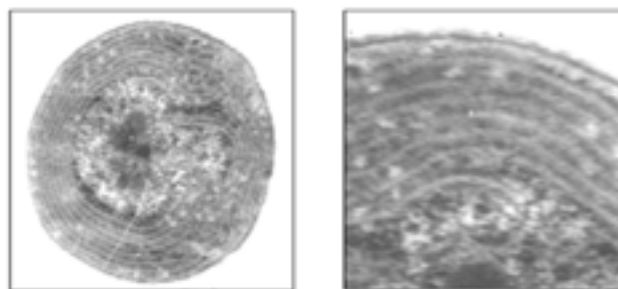


Рис. 3. Ультраструктура клеток *Synechocystis* sp. PCC 6803 и CALU 713 в контроле. Звездочкой отмечена зона нуклеоида, черным треугольником – тилакоиды, белым треугольником – фикобилисомы. Масштаб – 0,2 мкм.

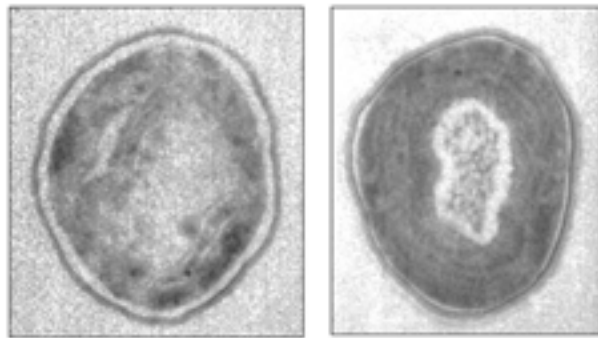


Рис. 4. Ультраструктура клеток *Synechocystis* sp. PCC 6803 после 7 суток культивирования в среде с солями тяжелых металлов. Звездочкой отмечена зона нуклеоида, черным треугольником – деструкция тилакоидов в хроматоплазме, черной стрелкой – отслоение клеточной стенки. Масштаб – 0,5 мкм

ный, агрегировал в нерегулярно расположенные плотные тяжи (рис.4).

При культивировании цианобактерий в средах, содержащих соли тяжелых металлов, происходило скопление муреина в области септы, что препятствовало процессу деления клеток (рис. 5).

Таким образом, токсическое действие солей тяжелых металлов проявлялось морфологическими изменениями клеток в виде изменения в форме и размере клеток, в появлении способности, не свойственной для данных штаммов, формировать многоклеточные микроагрегаты и цепочки. Ультраструктурные изменения выражались в утолщении клеточной стенки; расхождении тилакоидных мембран с расширением внутритилакоидного пространства внутри клетки; цитоплазма теряла характерную зернистость и в ней появлялись обширные светлые участки; нуклеоид приобретал волокнистую структуру; в нуклеоплазме на некоторых срезах отмечены электроплотные внутрицитоплазматические структуры. Зафиксировано нарушение в процессе деления, что, очевидно, связано с объяснялось наличием между дочерними клетками толстого слоя муреина. Выяв-

ленные морфологические изменения цианобактерий носили неспецифический характер.

Заключение.

Таким образом, выявленные морфологические адаптации могут быть использованы в качестве тестов при биоиндикации загрязненной среды.

Выводы:

1. Цианобактерии *Synechocystis* sp. PCC 6803 и *Synechocystis* sp. CALU 713 проявляли высокую чувствительность к тяжелым металлам (меди, кадмию, серебру и ртути); рост культуры ингибировали все испытанные металлы; чувствительность к ним у *Synechocystis* sp. CALU 713 была на порядок выше, чем у *Synechocystis* sp. PCC 6803.

2. *Synechocystis* sp. PCC 6803 и *Synechocystis* sp. CALU 713 могут быть использованы при тестировании загрязнений водной среды. Поскольку принятые в России ПДК по кадмию и серебру для тест-объектов токсичны, они недопустимы для экологической экспертизы загрязненных сред и нуждаются в пересмотре.

3. Морфологические изменения, вызванные тяжелыми металлами, носили неспецифический характер и проявлялись в нарушении деления и появления клеток с измененной формой и размером.

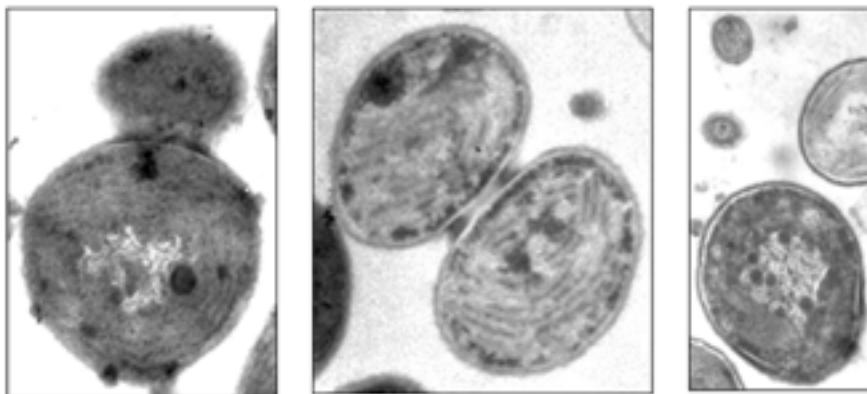


Рис. 5. Ультраструктура клеток CALU 713 после 7 суток культивирования в среде с тяжелыми металлами. Черной стрелкой отмечено отслоение клеточной стенки, белой стрелкой – муреин. Масштаб – 0,5 мкм.

4. При воздействии тяжёлыми металлами на клетки цианобактерий выявлены неспецифические нарушения на ультроструктурном уровне, выраженные в изменении толщины и целостности пептидогликанового слоя, расхождении тилакоидных мембран с образованием внутритилакоидных пространств; агглютинации фикобилисом и накоплении полифосфатных гранул; нуклеоплазма те-

ряет зернистость и становится волокнистой. Все эти структуры, возможно, участвуют в связывании катионов металлов и их детоксикации.

5. *Synechocystis* sp. PCC 6803 и *Synechocystis* sp. CALU 713 могут быть использованы в качестве экспериментальной модели для исследования токсичности тяжёлых металлов при тестировании загрязнений водной и почвенной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беккер А.А., Агаев Т.Б. Охрана и контроль загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеоздат; 1989.
2. Богачева А.С., Шилов В.В., Полозова Е.В., Ключкин И.Н. Перспективы использования цианобактерий *Synechocystis* sp. для оценки степени загрязненности водных объектов солями тяжелых металлов. Санитария и гигиена. 2017; 7: 656-61.
3. Зарицкая Е.В., Шилов В.В., Полозова Е.В., Богачева А.С. Современные альтернативные методы исследования, используемые для оценки безопасности продукции. Экология человека. 2017; 3: 21-5.
4. Громов Б.В., Павленко Г.В. Экология бактерий. Л.: Издательство Ленингр. ун-та; 1989.
5. Гусев М.В., Минеева Л.А. Микробиология. М.: Академия; 2003.
6. Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н. Введение в природоведческую микробиологию. М.: Университет; 2001.
7. Ramus J. The capture and transduction of light energy. The Biology of Seaweeds. Oxford: Blackwell Sci. Publ. 1981: 458-92.
8. Skulberg O.M., Geoffrey A., Carmichael C., Carmichael W.W. Toxic blue-green algal blooms in Europe: a growing problem. AMBIO. 1984; 13: 244-7.
9. Савельев И.Б., Селях И.О. Влияние ионов цинка на морфологию и ультроструктуру клеток цианобактерий. В кн.: Материалы международной научной конференции «Автотрофные микроорганизмы». М.; 2000: 159-60.

REFERENCES:

1. Bekker A.A., Agayev T.B. Protection and control of environmental pollution. L.: Hydrometeoizdat; 1989. (in Russian)
2. Bogacheva A.S., Shilov V.V., Polozova E.V., Klyushkin I.N. Prospects for the use of cyanobacteria *Synechocystis* sp. to assess the degree of contamination of water bodies with heavy metal salts. Sanitation and hygiene. 2017; 7: 656-61. (in Russian)
3. Zaritskaya E.V., Shilov V.V., Polozova E.V., Bogacheva A.S. Modern alternative research methods used to assess product safety. Human ecology. 2017; 3: 21-5. (in Russian)
4. Gromov B.V., Pavlenko G.V. Ecology of bacteria. L: Leningrad Publishers. un-that; 1989. (in Russian)
5. Gusev M.V., Mineeva L.A. Microbiology. M.: Academy; 2003. (in Russian)
6. Zavarzin G.A., Kolotilova N.N. Introduction to the natural history of microbiology. M.: University; 2001. (in Russian)
7. Ramus J. The capture and transduction of light energy. The Biology of Seaweeds. Oxford: Blackwell Sci. Publ. 1981: 458-92.
8. Skulberg O.M., Geoffrey A., Carmichael C., Carmichael W.W. Toxic blue-green algal blooms in Europe: a growing problem. AMBIO. 1984; 13: 244-7.
9. Saveliev I.B., Selyah I.O. The effect of zinc ions on the morphology and ultrastructure of cyanobacteria cells. In: Materials of the International Scientific Conference "Autotrophic Microorganisms". M.; 2000: 159-60. (in Russian)

A.S. Bogacheva^{1,2}, E.V. Polozova^{1,2}, V.V. Shilov², E.V. Davydova^{2,3}, M.A. Yudin^{2,4}, I.N. Klyushkin⁵

INDICATION OF WATER POLLUTION WITH HEAVY METALS BY MEANS OF CYANOBACTERIA *SYNECHOCYTIS* sp.

¹I.P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, 197022, Saint Petersburg, Russian Federation

²I.I. Mechnikov North-Western State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, 195271, Saint Petersburg, Russian Federation

³S.M. Kirov Military Medical Academy, 194044, Saint Petersburg, Russian Federation

⁴State Research Testing Institute of Military Medicine, Ministry of Defense of the Russian Federation, 195043, Saint Petersburg, Russian Federation

⁵Center for Hygiene and Epidemiology in Saint Petersburg in Moscow, Frunze, Pushkin, Kolpinsky districts and the city of Pavlovsk, 192102, Saint Petersburg, Russian Federation

The sensitivity of cyanobacteria to heavy metal salts under different cultivation conditions has been investigated. It is shown that the decrease in temperature and the lack of illumination of the environment increase the toxic effect of heavy metals. Data on morphological changes of cyanobacteria caused by toxic effects of heavy metals are presented. It is noted that cyanobacteria can be used as an experimental model to study the toxicity of heavy metals in the testing of water and soil pollution.

Keywords: cyanobacteria, heavy metals, electron microscopy, experimental model, morphological changes, *Synechocystis* sp.

Материал поступил в редакцию 23.04.2019 г.