

Пигментная система нитчатых цианобактерий в условиях аккумуляции ионов свинца

© 2024. А. Р. Гальперина, к. б. н., доцент,
Астраханский государственный технический университет,
414056, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16,
e-mail: alina_r_s@rambler.ru

Изучено влияние растворов $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ с концентрациями Pb^{2+} , равными 0,02; 0,1; 0,2 и 0,4 мМ, на штамм нитчатой цианобактерии (ЦБ) *Leptolyngbya* sp. SK. Продолжительность экспозиции культуры с растворами составила 21 сутки. В течение эксперимента измеряли убыль Pb^{2+} в растворе; оценивали прирост биомассы ЦБ как показатель адаптации культуры; определяли содержание фотосинтетических пигментов как показатели сохранения жизнеспособности ЦБ. Содержание ионов свинца снизилось во всех вариантах; максимальная убыль (на 96,2%) наблюдалась в растворе с концентрацией Pb^{2+} , равной 0,4 мМ. Увеличение биомассы ЦБ наблюдалось в присутствии всех концентраций Pb^{2+} , максимальный прирост в растворе с концентрацией Pb^{2+} 0,1 мМ – до 7,5 раз. С увеличением концентрации Pb^{2+} в растворе происходило снижение содержания хлорофилла *a* в клетках ЦБ по сравнению с контролем на 67,0–94,2%. Под действием растворов с концентрациями Pb^{2+} 0,02; 0,1 и 0,4 мМ содержание каротиноидов в клетках ЦБ снизилось на 48, 75 и 92% соответственно; при этом концентрация Pb^{2+} 0,2 мМ вызвала увеличение содержания каротиноидов на 1% по сравнению с контролем. Отмечено ингибирующее действие всех исследованных концентраций Pb^{2+} на комплекс фикобилиновых пигментов. Аккумуляция ионов свинца из растворов с концентрациями Pb^{2+} до 0,4 мМ, прирост биомассы ЦБ в присутствии 0,1 мМ Pb^{2+} и повышение синтеза каротиноидов при 0,2 мМ Pb^{2+} могут свидетельствовать об адаптации исследуемой культуры к ацетату свинца.

Ключевые слова: цианобактерии, ионы свинца (II), фотосинтетические пигменты, токсичность.

Pigment system of filamentous cyanobacteria under conditions of accumulation of lead ions

© 2024. A. R. Galperina ORCID: 0000-0002-8486-592X*
Astrakhan state technical university,
16, Tatishcheva St., Astrakhan, Russia, 414056,
e-mail: alina_r_s@rambler.ru

The effect of $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ solutions with Pb^{2+} concentrations equal to 0.02, 0.1, 0.2 and 0.4 mM to strain of cyanobacteria (CB) *Leptolyngbya* sp. SK was studied. The duration of exposure of the culture with solutions was 21 days. During the experiment, measured the loss of lead ions in the solution; the increase in the biomass of CB was assessed as an indicator of culture adaptation; determined the content of photosynthetic pigments as indicators of maintaining the viability of the culture. The content of lead ions decreased in all variants, the maximum decrease was 96.2% – in the medium with a Pb^{2+} concentration of 0.4 mM. An increase in the biomass of CB was observed in the presence of Pb^{2+} of all concentrations, the maximum increase in a solution with a Pb^{2+} concentration of 0.1 mM was up to 7.5 times. There was a decrease in the content of chlorophyll *a* in the biomass of CB, in comparison with the control, by 67.0–94.2% with an increase in the concentration of Pb^{2+} in the solution. Under the influence of solutions with Pb^{2+} concentrations of 0.02, 0.1, and 0.4 mM, the content of carotenoids in the biomass of cyanobacteria decreased by 48%, 75% and 92%, respectively; the concentration of Pb^{2+} 0.2 mM caused an increase in the content of carotenoids by 1% with the control. The inhibitory effect of all investigated concentrations of Pb^{2+} was noted on the complex of phycobilin pigments. The accumulation of lead ions from solutions with Pb^{2+} concentrations up to 0.4 mM, an increase in CB biomass in the presence of 0.1 mM Pb^{2+} and an increase in the synthesis of carotenoids at 0.2 mM Pb^{2+} may indicate adaptation of the studied culture to lead acetate.

Keywords: cyanobacteria, lead (II) ions, photosynthetic pigments, toxicity.

В настоящее время одними из наиболее серьёзных источников загрязнения окружающей среды являются соли свинца. Загрязнение природных объектов происходит в результате

процесса обжига и плавки свинцовых руд, при сжигании угля, древесины и других органических материалов, включая городские отходы и автомобильное топливо. Свинец не

выполняет биологических функций. Он токсичен, относится к I классу опасности и способен к аккумуляции в цепях питания живых организмов. При этом свинец не разрушается, а способен только перераспределяться между компонентами природной среды [1, 2].

Цианобактерии (ЦБ), являясь прокариотами, обладают способностью быстрого реагирования на внешние воздействия окружающей среды. Их ответные реакции (размеры, морфология, ультраструктура клеток и физиолого-биохимические признаки) могут служить репрезентативными показателями состояния водных и почвенных экосистем [3–7]. Помимо этого, ЦБ участвуют в биоаккумуляции и детоксикации тяжёлых металлов (ТМ) [8]. Многими исследователями отмечено снижение содержания фотосинтетических пигментов в клетках ЦБ под воздействием ТМ [9–11]. Вместе с тем, имеются данные о существенной роли каротиноидных и фикобилиновых пигментов в инактивации ионов ТМ и снижению их токсичности [3, 12].

Несмотря на то, что биология ЦБ находится в последнее время в центре внимания, работы, касающиеся ответа пигментной системы на воздействие ионов свинца, немногочисленны [9, 11, 13]. Поэтому целью работы являлось изучение особенностей пигментной системы нитчатых цианобактерий рода *Leptolyngbya* в условиях аккумуляции ионов свинца.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – штамм нитчатых ЦБ *Leptolyngbya* sp. SK, выделенный из лабораторного цианобактериального сообщества. Культивирование ЦБ проводили на среде BG-11 в колбах Эрленмейера при температуре 20 ± 2 °C и постоянном искусственном освещении 1500 люкс. Свинец вносили в среду в виде ацетата $Pb(CH_3COO)_2$. В эксперименте использовали концентрации свинца 0,02; 0,1; 0,2; 0,4 мМ/дм³. Контрольными вариантами служили: микроэкосистема с цианобактериальным штаммом, культивируемым на чистой питательной среде и неинокулированная ЦБ питательная среда, содержащая $Pb(CH_3COO)_2$ с концентрациями ионов свинца 0,02; 0,1; 0,2; 0,4 мМ/дм³. Рост ЦБ контролировали по приросту сырой биомассы. Повторность опыта трёхкратная. Длительность эксперимента составила 21 сутки.

Определение содержания ионов свинца в водной среде проводилось методом атомно-абсорбционной спектроскопии [14, 15] со-

гласно ПНД Ф 14.1:2:4.214-06. О поглощающей способности ЦБ судили по снижению концентрации Pb^{2+} в среде, что определяли по формуле:

$$(C_{нач} - C_{кон}) / C_{нач} \cdot 100\%,$$

где $C_{нач}$ – исходная; $C_{кон}$ – конечная концентрация свинца в среде культивирования [16].

Контроль пигментного комплекса ЦБ осуществляли по изменению содержания хлорофилла *a*, каротиноидов и фикобилипротеинов. Содержание фотосинтетических пигментов в клетках исследуемых ЦБ определяли колориметрическим методом. Экстракцию хлорофилла *a* и каротиноидов проводили 70,0% этиловым спиртом [17]. Для определения концентраций пигментов в вытяжке использовали формулы Вернона [18] и Виттштейна [19]. Фикобилипротеиды – фикоцианин, аллофикоцианин и фикоэритрин экстрагировали фосфатным буфером с применением 10-ти кратного замораживания. Концентрацию фикобилипротеинов рассчитывали по формулам Сигелмана и Кайси [20].

Статистический анализ проводили средствами пакета Statistica 6.1 (StatSoft Inc., USA). Данные представляли в виде $x \pm SD$. Для сравнения двух независимых выборок использовали критерий Фишера (при $P \geq 0,95$ различия считали достоверными, предварительно проверив данные на нормальность распределения).

Результаты и обсуждение

Способность ЦБ аккумулировать ионы Pb^{2+} . В ходе исследований отмечено снижение концентрации ионов Pb^{2+} в растворе. Степень извлечения возрастала в зависимости от увеличения исходной концентрации Pb^{2+} : минимальная (51,6%) – в растворе с концентрацией ионов Pb^{2+} 0,02 мМ, максимальная (96,2%) – в растворе с 0,4 мМ. Убыль в абиотическом контроле не превышала 3,2% (рис. 1)

Возрастание степени извлечения ионов металла в зависимости от увеличения концентрации характерно для микроорганизмов, в том числе и для ЦБ. Это связано с постепенным насыщением связей функциональных групп на поверхности микробных клеток [5, 11, 16, 21, 22].

Рост ЦБ в условиях аккумуляции ионов свинца. В микроэкосистемах с концентрациями Pb^{2+} 0,1; 0,2 и 0,4 мМ наблюдалось

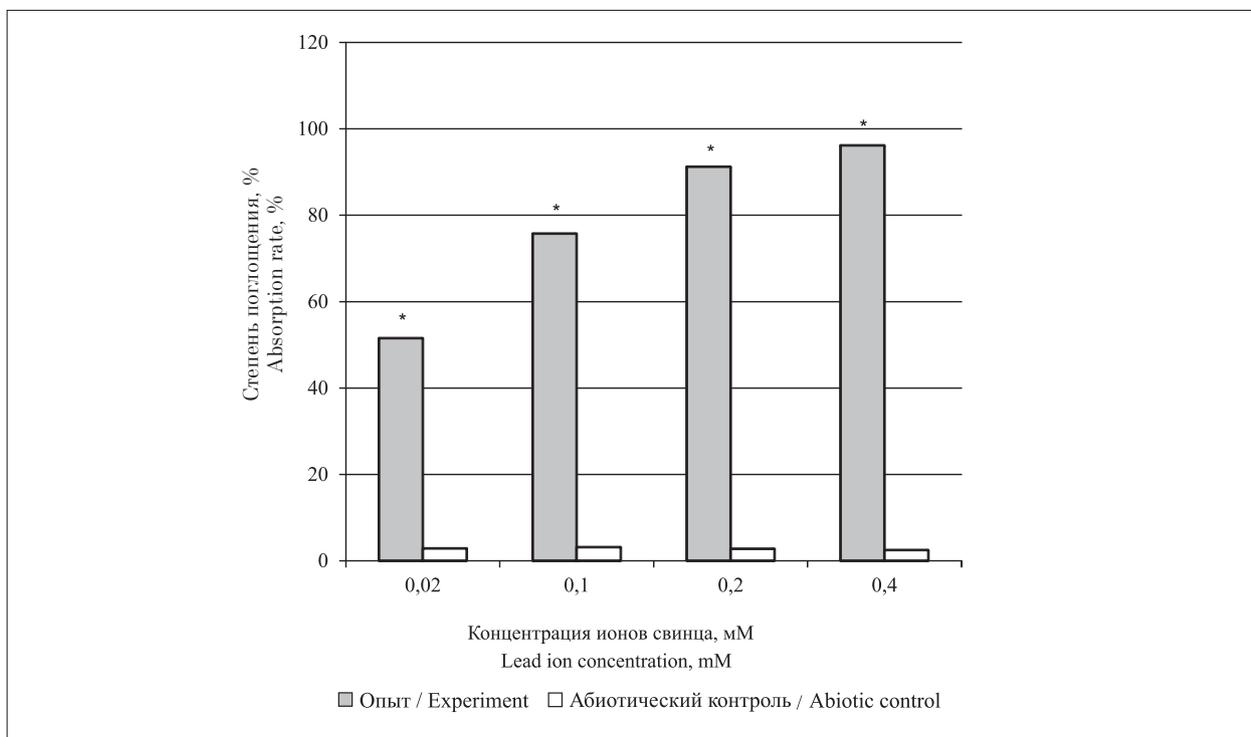


Рис. 1. Степень поглощения свинца цианобактерией. Примечание к рисункам 1–4 и таблицам 1, 2: «*» – результаты, достоверно отличающиеся от абиотического контроля при $P \geq 0,95$
Fig. 1. The rate of absorption of lead by cyanobacteria. Note to Figures 1–4 and Tables 1, 2: “*” – the results are significantly different from abiotic control at $P \geq 0,95$

Таблица 1 / Table 1

Прирост биомассы цианобактерий в эксперименте
 Increase in the biomass of cyanobacteria in the experiment

Концентрация (Pb ²⁺), мМ Concentration (Pb ²⁺), mM	Прирост биомассы, г / Increase in biomass, g
0	0,12±0,01
0,02	0,155±0,008
0,1	1,03±0,05*
0,2	0,845±0,005
0,4	0,545±0,027*

увеличение биомассы по сравнению с контрольной микросистемой. Максимальное накопление биомассы ЦБ до 7,5 раз отмечено в присутствии 0,1 мМ Pb²⁺ (табл. 1).

Увеличение биомассы может быть связано как с непосредственной адсорбцией ионов металла клетками, особенно в растворах с высокими концентрациями Pb(CH₃COO)₂, так и со стимулирующим эффектом низких концентраций ионов ТМ на рост ЦБ. Подобные результаты аналогичны полученным при изучении воздействия ионов свинца и меди в концентрациях 0,5 мг/л для *Spirulina platensis* [11] и воздействия ионов меди и кобальта в концентрациях 0,5 мг/л на *Lyngbya putealis* [12].

Изменение пигментной системы ЦБ в условиях аккумуляции ионов свинца. В экс-

перименте наблюдалось последовательное снижение содержания хлорофилла *a* в биомассе ЦБ под действием возрастающих концентраций ионов свинца в растворе. Минимальное содержание хлорофилла *a* наблюдалось в присутствии 0,4 мМ Pb²⁺ (рис. 2).

Снижение интенсивности фотосинтетических процессов за счёт подавления синтеза хлорофилла *a* является одним из первых признаков интоксикации ТМ. Оно может быть вызвано изменением функциональной структуры тилакоидов: увеличением межтилакоидного пространства и накоплением внутри него частиц металла, образованием мембранных везикул [23–25].

Концентрация каротиноидов в биомассе ЦБ под воздействием Pb²⁺ изменялась неоднозначно. При концентрации Pb²⁺ 0,2 мМ

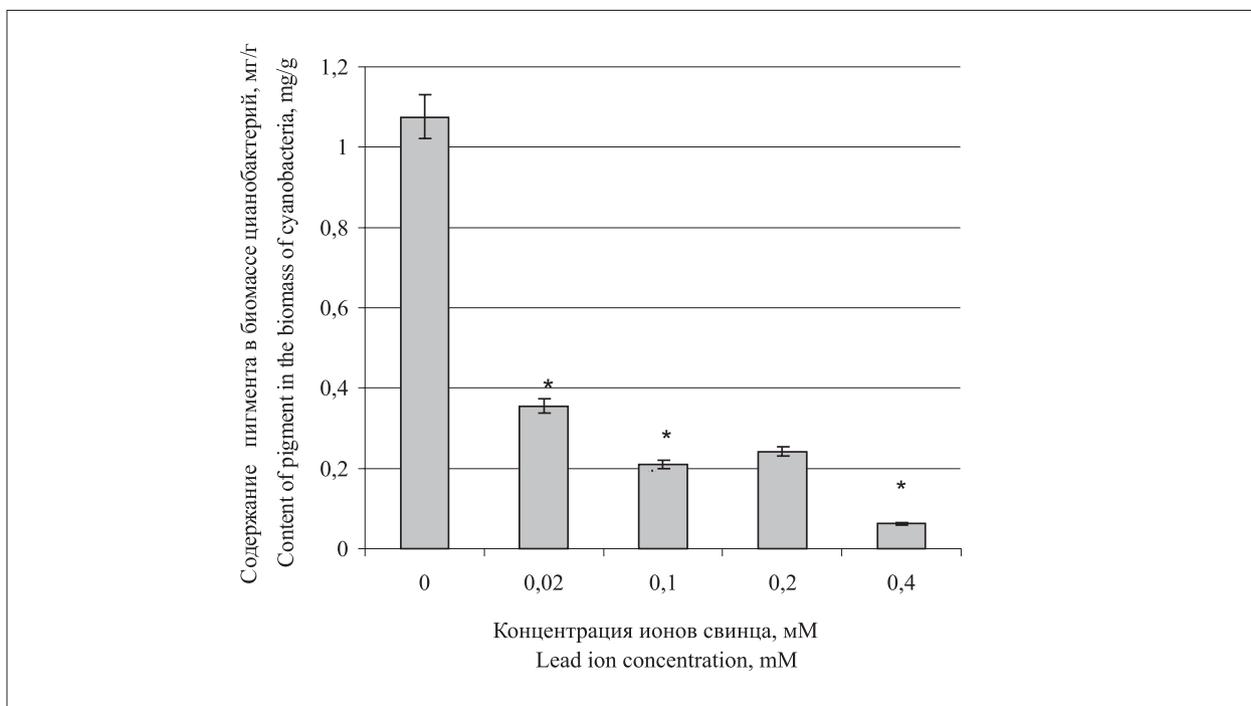


Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* в биомассе цианобактерий
Fig. 2. Content of chlorophyll *a* in the biomass of cyanobacteria

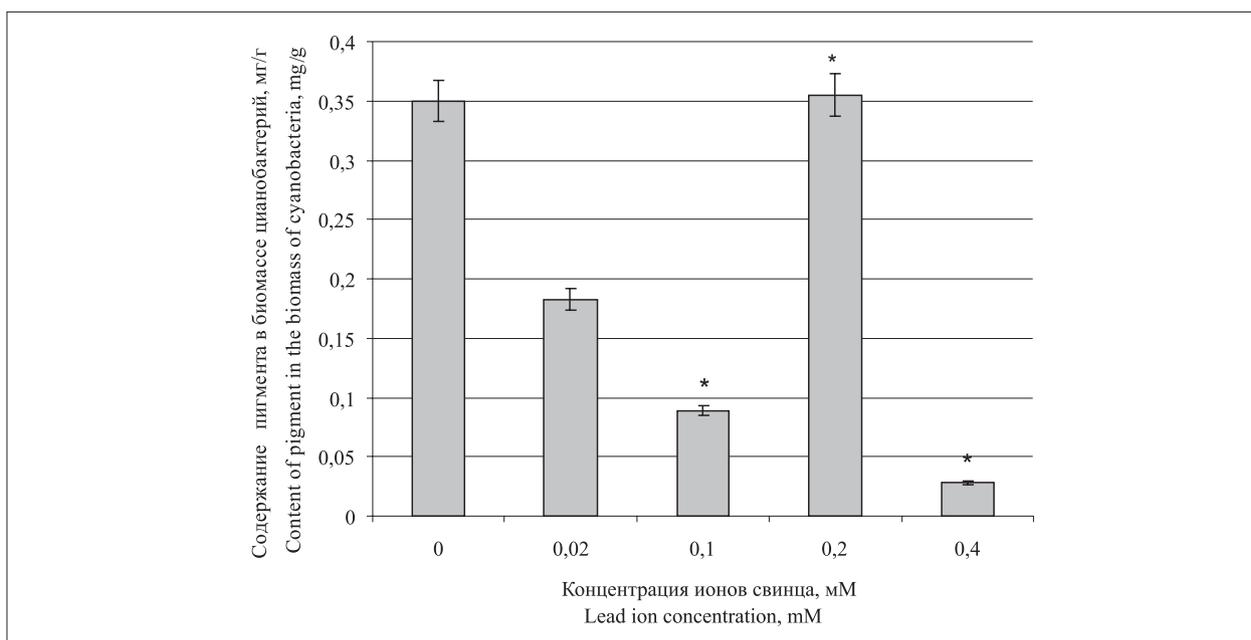


Рис. 3. Содержание каротиноидов в биомассе цианобактерий
Fig. 3. Content of carotenoids in the biomass of cyanobacteria

наблюдалось максимальное увеличение содержания каротиноидов, на 1% превышающее содержание в контрольном варианте (рис. 3).

Поскольку каротиноидные пигменты играют защитную роль в процессах фотосинтеза, предохраняя липидный слой тилакоидных мембран от перекисления, стимуляция их синтеза может свидетельствовать об активации

клеточных процессов детоксикации. Увеличение концентрации каротиноидов наблюдалось при оценке воздействия ионов Co^{2+} и Zn^{2+} на *Anabaena oryzae* [10].

Соотношение суммы каротиноидов и хлорофилла *a* (пигментный индекс) является одной из характеристик физиологического состояния клеток ЦБ (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Пигментный индекс штамма *Leptolyngbya* sp. SK при росте на среде с Pb²⁺
 Pigment index of cyanobacteria grown in media with Pb²⁺

Концентрация (Pb ²⁺), мМ / Concentration (Pb ²⁺), mM	Пигментный индекс / Pigment index
0	0,93±0,05
0,02	0,51±0,03
0,1	0,430±0,024*
0,2	1,47±0,11
0,4	0,440±0,025*

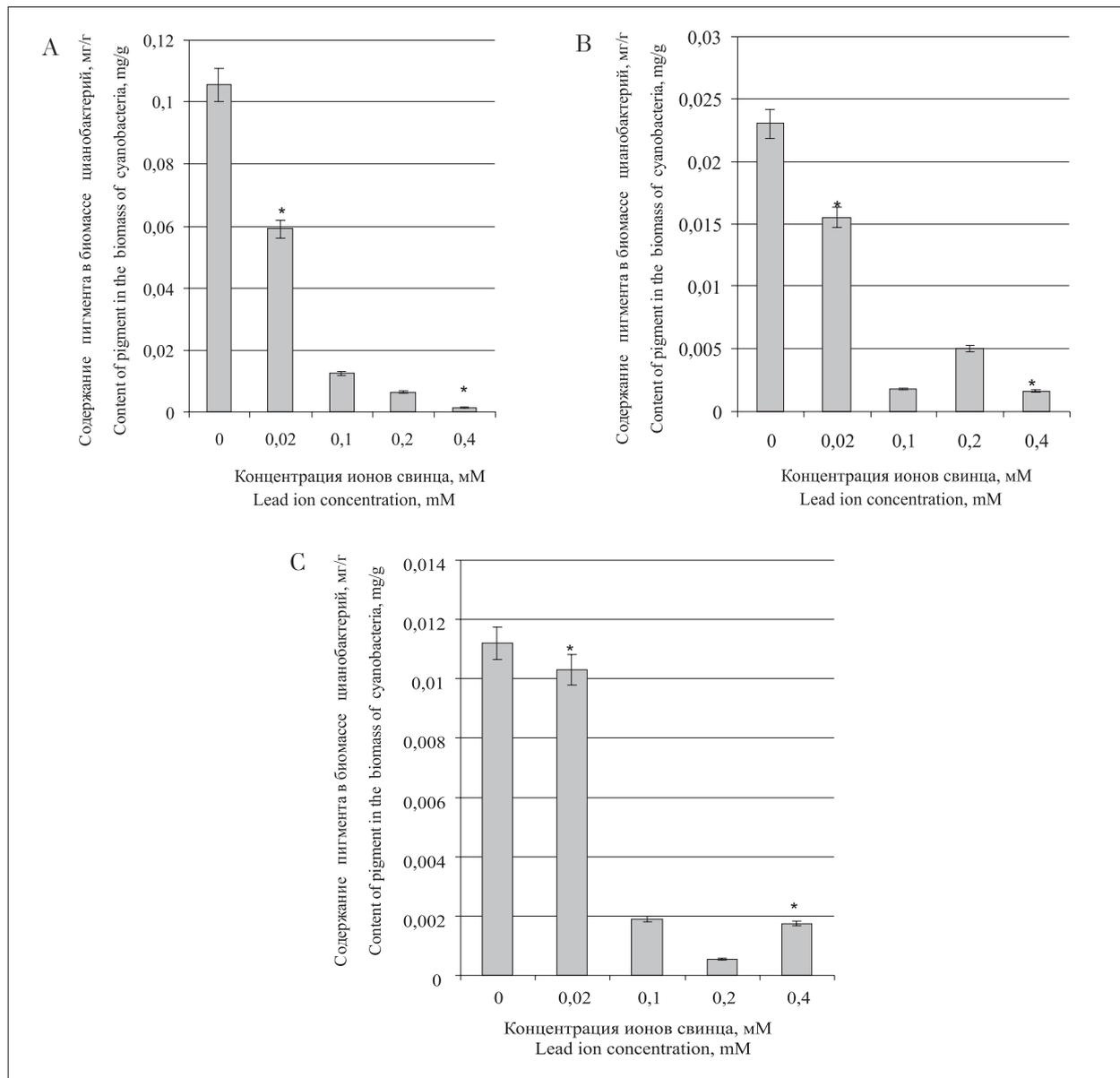


Рис. 4. Содержание фикобилиновых пигментов в биомассе цианобактерий:
 А – фикоцианин, В – аллофикоцианин, С – фикоэритрин
Fig. 4. Content of phycobilin pigments in the biomass of the cyanobacteria:
 А – phycocyanin, В – allophycocyanin, С – phycoerythrin

Существенное увеличение пигментного индекса под воздействием 0,2 мМ Pb²⁺ может свидетельствовать о низкой фотосинтетической активности клеток ЦБ. Вместе с тем,

повышение значения пигментного индекса за счёт увеличения синтеза каротиноидов демонстрирует наличие механизмов защиты фотосинтетического аппарата [26].

При изучении воздействия Pb^{2+} на комплекс фикобилиновых пигментов отмечено ингибирующее действие всех используемых концентраций (рис. 4А-С).

Снижение концентрации фикобилиновых пигментов указывает на ухудшение передачи световой энергии, собираемой ими и передаваемой далее фотохимически активным молекулам. Это также является одним из свидетельств угнетения процесса фотосинтеза [9, 26].

Заключение

Установлено, что нитчатая ЦБ *Leptolyngbya* sp. SK способна аккумулировать Pb^{2+} из растворов с концентрациями 0,02; 0,1; 0,2; 0,4 мМ. Максимальное извлечение наблюдалось из растворов с концентрацией Pb^{2+} 0,4 мМ (до 96%), превосходя абиотический контроль в 30 раз.

Некоторые концентрации Pb^{2+} в растворе способствовали приросту биомассы: при концентрации 0,1 мМ Pb^{2+} биомасса выросла в 7,5 раз.

С увеличением содержания Pb^{2+} наблюдалось последовательное снижение содержания хлорофилла *a* и фикобилиновых пигментов. При этом угнетение синтеза каротиноидов происходило менее интенсивно; в присутствии 0,2 мМ Pb^{2+} наблюдалась слабая стимуляция (до 1%).

Существенный прирост биомассы ЦБ в присутствии 0,1 мМ Pb^{2+} и повышение синтеза каротиноидов при 0,2 мМ Pb^{2+} могут свидетельствовать об адаптации исследуемой культуры к ацетату свинца.

Исследования проведены за счёт средств на выполнение государственного задания в рамках НИОКР «Микроорганизмы аридных зон как основа экобиотехнологий для оздоровления экосистем Нижнего Поволжья» (№ 124041100137-2).

Литература

1. Пищик В.Н., Воробьев Н.И., Проворов Н.А., Хомяков Ю.В. Механизмы адаптации микроорганизмов в растительно-микробных системах к тяжёлым металлам // Микробиология. 2016. Т. 85. № 3. С. 231–247. doi: 10.7868/S0026365616030113
2. Розанов Л.Л. Геоэкологические процессы в окружающей среде: методологический аспект // Вестник Московского государственного областного университета. Серия Естественные науки. 2017. № 2. С. 71–80. doi: 10.18384/2310-7189-2017-24-71-80
3. Bekasova O.D., Brekhovskikh A.A., Moskvina M.I. Participation of extracellular polysaccharides in detoxica-

tion of cadmium ions by cyanobacteria *Nostoc muscorum* // Biophysics. 2002. V. 47. No. 3. P. 515–523.

4. Shilpi G., Sunita S., Sweta S. Hexavalent chromium toxicity to cyanobacterium *Spirulina platensis* // International Research Journal of Pharmacy. 2014. V. 5. No. 12. P. 910–914. doi: 10.1109/ASENSE.2003.1225018

5. Фокина А.И., Горностаева Е.А., Огородникова С.Ю., Зыкова Ю.Н., Домрачева Л.И., Кондакова Л.В. Адаптационные резервы почвенных биопленок с доминированием цианобактерий рода *Phormidium* // Сибирский экологический журнал. 2015. Т. 22. № 6. С. 842–851. doi: 10.15372/SEJ2015060

6. Фокина А.И., Огородникова С.Ю., Домрачева Л.И., Лялина Е.И., Горностаева Е.А., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В. Цианобактерии как тест-организмы и биосорбенты // Почвоведение. 2017. № 1. С. 77–85. doi: 10.7868/S0032180X16110034

7. Фокина А.И., Лялина Е.И., Трефилова Л.В., Ашихмина Т.Я. Отклик почвенной цианобактерии *Nostoc paludosum* на действие сульфата меди(II) в присутствии глутатиона восстановленного // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 102–108. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-101-108

8. Dubey S.K., Mehra J.S., Tiwari P., Bishwas A.J. Potential use cyanobacterial species in bioremediation of industrial effluents // African Journal of Biotechnology. 2011. V. 10. No. 7. P. 1125–1132. doi: 10.3389/ajpls.2016.00303

9. Arunakumara K.K.I.U., Zhang Xuecheng. Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae // Oceanic and Coastal Sea Research. 2008. V. 7. No. 1. P. 60–64. doi: 10.1007/s11802-008-0060-y

10. Chakilam S.R. Metal effects on carotenoid content of cyanobacteria // International Journal of Botany. 2012. V. 8. No. 4. P. 192–197. doi: 10.3923/ijb.2012.192.197

11. El-Din S.M. Effect of copper and lead on growth and some metabolic activities of cyanobacterium *Spirulina platensis* (Nordstedt) // Egyptian Journal of Botany. 2017. V. 57. No. 3. P. 445–456. doi: 10.21608/ejbo.2017.822.1055

12. Kiran B., Thanasekaran K. Metal tolerance of an indigenous cyanobacterial strain, *Lyngbya putealis* // International Biodeterioration & Biodegradation. 2011. V. 65. No. 8. P. 1128–1132. doi: 10.1016/j.ibiod.2011.08.011

13. Hemlata F.T. Screening of cyanobacteria for phycolipids and effect of different environmental stress on its yield // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2009. V. 83. No. 4. P. 509–513. doi: 10.1007/s00128-009-9837y

14. Прайс В. Аналитическая спектрометрия атомно-абсорбционная. М.: Мир, 1976. 355 с.

15. Брицке М.Э. Атомно-адсорбционный спектрально-химический анализ. М.: Химия, 1982. 223 с.

16. Литвиненко Л.В. Способность актинобактерий родов *Dietzia*, *Gordonia* и *Rhodococcus* аккумулировать ионы никеля // Микробиология. 2019. Т. 88. № 2. С. 207–216. doi: 10.1134/S002636561902006X

17. Сиренко Л.А. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике. Киев: Наукова думка. 1975. 247 с.

18. Vernon L.P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts // Analytical Chemistry. 1960. V. 32. P. 1144–1150.

19. Wettstein P. Von Chromofyll – letal und der submicroscopische Form wechsel der Plastiden // Experimental Cell Research. 1957. V. 12. P. 427–431.

20. Siegelman H.W., Kycia H.J. Algal biliproteins // Handbook of Phycological Methods / Eds. J.A. Hellebust, J.S. Craigie. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. P. 71–79.

21. Abdel-Aty M., Hassan Y., Al-Ghamdi A. Real-time prediction of visibility related crashes // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2012. V. 24. P. 288–298. doi: 10.1016/j.trc.2012.04.001

22. Al-Homaidan A.A., Alabdullatif J.A., Al-Hazzani A.A., Al-Ghanayem A.A., Alabbad A.F. Adsorptive removal of cadmium ions by *Spirulina platensis* dry biomass // Saudi Journal of Biological Sciences. 2015. V. 22. No. 6. P. 795–800. doi: 10.1016/j.sjbs.2015.06.010

23. Heng L.Y., Jusoh K., Mui Ling., Idris M. Toxicity of single and combinations of lead and cadmium to the cyanobacteria *Anabaena flos-aquae* // Bulletin Environmental Contamination and Toxicology. 2004. V. 72. P. 373–379 doi: 10.1007/s00128-003-8923-9

24. Wong L.S., Lee Y.H., Surif S. Fluorometric response of cyanobacteria to the combination of heavy metals // Int'l Conf. on Advances in Environment, Agriculture & Medical Sciences (ICAEM'14). Kuala Lumpur (Malaysia), 2014. P. 7–9. doi: 0.17758/IAAST.A1114051

25. Deep P.R., Bhattacharyya S., Nayak B. Effect on biochemical parameters of cyanobacterium *Anabaena* sp. under lead stress // International Journal of Advanced Research. 2016. V. 4. No. 9. P. 2114–2129. doi: 10.21474/IJAR01/1697

26. Mulders K.J.M., Lamers P.P., Martens D.E., Wijffels R.H. Phototrophic pigment production with microalgae: biological constraints and opportunities // Journal of Phycolgy. 2014. V. 50. P. 229–242. doi: 10.1111/jpy.12173

27. Yruela I. Copper in plants: Acquisition, transport and interactions // Functional Plant Biology. 2009. V. 36. No. 5. P. 409–410. doi: 10.1071/FP08288

References

1. Pischik V.N., Vorobev N.I., Provorov N.A., Khomyakov Yu.V. Mechanisms of plant and microbial adaptation to heavy metals in plant – microbial systems // Microbiologia. 2016. V. 85. No. 3. P. 231–247 (in Russian). doi: 10.7868/S0026365616030113

2. Rozanov L.L. Geocological processes in the environment: methodology aspect // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki. 2017. V. 2. P. 71–80 (in Russian). doi: 10.18384/2310-7189-2017-2-71-80

3. Bekasova O.D., Brekhovskikh A.A., Moskvina M.I. Participation of extracellular polysaccharides in detoxication of cadmium ions by cyanobacteria *Nostoc muscorum* // Biophysics. 2002. V. 47. No. 3. P. 515–523.

4. Shilpi G., Sunita S., Sweta S. Hexavalent chromium toxicity to cyanobacterium *Spirulina platensis* // International Research Journal of Pharmacy. 2014. V. 5. No. 12. P. 910–914. doi: 10.1109/ASENSE.2003.1225018

5. Fokina A.I., Gornostaeva E.A., Ogorodnikova S.Yu., Zykova Yu.N., Domracheva L.I., Kondakova L.V. Adaptation reserves of soil biofilms with dominance of cyanobacteria of the genus *Phormidium* // Contemporary Problems of Ecology. 2015. V. 22. No. 6. P. 842–851 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ2015060

6. Fokina A.I., Ogorodnikova S.Yu., Domracheva L.I., Lyalina E.I., Gornostaeva E.A., Ashihmina T.Ya., Kondakova L.V. Cyanobacteria as test-organisms and biosorbents // Pochvovedenie. 2017. V. 1. P. 77–85 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X16110034

7. Fokina A.I., Lyalina E.I., Trefilova L.V., Ashihmina T.Ya. The response of soil cyanobacteria *Nostoc paludosum* to the effect of copper(II) sulfate in the presence of the restored glutathione // Theoretical and Applied Ecology. 2019. V. 3. P. 102–108 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-101-108

8. Dubey S.K., Mehra J.S., Tiwari P., Bishwas A.J. Potential use cyanobacterial species in bioremediation of industrial effluents // African Journal of Biotechnology. 2011. V. 10. No. 7. P. 1125–1132. doi: 10.3389/fpls.2016.00303

9. Arunakumara K.K.I.U., Zhang Xuecheng. Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae // Oceanic and Coastal Sea Research. 2008. V. 7. No. 1. P. 60–64. doi: 10.1007/s11802-008-0060-y

10. Chakilam S.R. Metal effects on carotenoid content of cyanobacteria // International Journal of Botany. 2012. V. 8. No. 4. P. 192–197. doi: 10.3923/ijb.2012.192.197

11. El-Din S.M. Effect of copper and lead on growth and some metabolic activities of cyanobacterium *Spirulina platensis* (Nordstedt) // Egyptian Journal of Botany. 2017. V. 57. No. 3. P. 445–456. doi: 10.21608/ejbo.2017.822.1055

12. Kiran B., Thanasekaran K. Metal tolerance of an indigenous cyanobacterial strain, *Lyngbya putealis* // International Biodeterioration & Biodegradation. 2011. V. 65. No. 8. P. 1128–1132. doi: 10.1016/j.ibiod.2011.08.011

13. Hemlata F.T. Screening of cyanobacteria for phycobiliproteins and effect of different environmental stress on its yield // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2009. V. 83. No. 4. P. 509–513. doi: 10.1007/s00128-009-9837-y

14. Prays V. Analytical spectrometry atomic absorption. Moskva: Mir, 1976. 355 p. (in Russian).

15. Britske M.E. Atomic adsorption spectrochemical analysis. Moskva: Khimiya, 1982. 223 p. (in Russian).

16. Litvinenko L.V. Ability of the *Dietzia*, *Ghordonia* and *Rhodococcus* actinobacteria to accumulate nickel

- ions // *Microbiology*. 2019. V. 88. No. 2. P. 207–216 (in Russian). doi: 10.1134/S002636561902006X
17. Sirenko L.A. Methods of physiological and biochemical research of algae in hydrobiological practice. Kyiv: Naukova Dumka, 1975. 247 p. (in Russian).
18. Vernon L.P. Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts // *Analytical Chemistry*. 1960. V. 32. P. 1144–1150.
19. Wettstein P. Von Chrofyll – letal und der submicroscopische Form wechsel der Plastiden // *Experimental Cell Research*. 1957. V. 12. P. 427–431.
20. Siegelman H.W., Kycia H.J. Algal biliproteins // *Handbook of Phycological Methods* / Eds. J.A. Hellebust, J.S. Craigie. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. P. 71–79.
21. Abdel-Aty M., Hassan Y., Al-Ghamdi A. Real-time prediction of visibility related crashes // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2012. V. 24. P. 288–298. doi: 10.1016/j.trc.2012.04.001
22. Al-Homaidan A.A., Alabdullatif J.A., Al-Hazzani A.A., Al-Ghanayem A.A., Alabbad A.F. Adsorptive removal of cadmium ions by *Spirulina platensis* dry biomass // *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2015. V. 22. No. 6. P. 795–800. doi: 10.1016/j.sjbs.2015.06.010
23. Heng L.Y., Jusoh K., Mui Ling., Idris M. Toxicity of single and combinations of lead and cadmium to the cyanobacteria *Anabaena flos-aquae* // *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology*. 2004. V. 72. P. 373–379. doi: 10.1007/s00128-003-8923-9
24. Wong L.S., Lee Y.H., Surif S. Fluorometric response of cyanobacteria to the combination of heavy metals // *Int'l Conf. on Advances in Environment, Agriculture & Medical Sciences (ICAEAM'14)*. Kuala Lumpur (Malaysia), 2014. P. 7–9. doi: 0.17758/IAAST.A1114051
25. Deep P.R., Bhattacharyya S., Nayak B. Effect on biochemical parameters of cyanobacterium *Anabaena* sp. under lead stress // *International Journal of Advanced Research*. 2016. V. 4. No. 9. P. 2114–2129. doi: 10.21474/IJAR01/1697
26. Mulders K.J.M., Lamers P.P., Martens D.E., Wijffels R.H. Phototrophic pigment production with microalgae: biological constraints and opportunities // *Journal of Phycology*. 2014. V. 50. P. 229–242. doi: 10.1111/jpy.12173
27. Yruela I. Copper in plants: Acquisition, transport and interactions // *Functional Plant Biology*. 2009. V. 36. No. 5. P. 409–410. doi: 10.1071/FP08288