

УДК 581.1: 584.5

Е.И. ШНЮКОВА

Ин-т ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины,
Украина, 01001, Киев, ул Терещенковская, 2**АККУМУЛЯЦИЯ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ ЭКЗОПОЛИСАХАРИДАМИ
NOSTOC LINCKIA (ROTH) BORN. ET FLACH. (CYANOPHYTA)**

Исследована аккумуляция ионов металлов (меди, цинка, стронция) и селена в их смеси биомассой прокариотической гормогониевой синезеленой водорослью *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flach., способной активно синтезировать экзополисахариды, и препаратами выделенных экзополиоз. Показано, что степень очистки водной среды от ионов металлов зависит от функционального состояния культуры (возраст, интенсивность пролиферации, активность продуцирования экзополисахаридов). В условиях культуры *N. linckia* способен аккумулировать из окружающей среды от 35,82 до 94,16% ионов меди, цинка, стронция. Доминирующая роль в аккумуляции указанных металлов и селена из окружающей среды принадлежит экзополисахаридам, что связано с их анионной природой.

Ключевые слова: *Cyanophyta*, экзополисахариды, сорбция ионов металлов.

Введение

Многие микроводоросли способны синтезировать уникальные биополимеры, которые обладают рядом специфических свойств. Так, в частности, представители *Cyanophyta* и *Chlorophyta* продуцируют экзополисахариды, образуя слизистые капсулы. Эти биополимеры выполняют ряд важнейших функций (Drews, Weckesser, 1982; Painter, 1983; De Philippis, Vincenzini, 1998; Сакевич, 1998; Шнюкова, 2002). Гидрофильные полисахариды, входящие в состав слизистых чехлов, содержат полярные ОН-, СООН-, SO₃H-группы. Наличие в составе экзополисахаридов анионных групп определяет одну из их функций – способность связывать ионы металлов как в искусственно созданных условиях, так и в естественных фитоценозах (De Philippis, Vincenzini, 1998). Для очистки водной среды от тяжелых металлов могут быть использованы отдельные штаммы, осуществляющие их детоксикацию и непосредственное коцентрирование (Саванина и др., 1999; Пирог, 2001). Водоросли могут накапливать различные микроэлементы в количествах, иногда значительно превышающих их фоновое содержание в клетках. Имеются данные о поглощении микроводорослями цинка, кадмия, ртути, никеля, хрома, меди, золота (Harris et al., 1990; Усенко, Божков, 1991; Карамушка и др., 1995; Fisher et al., 1997; Голтвянский, 2002). Из водной среды микроводоросли аккумулируют как металлы, участвующие в их метаболизме, так и не использующиеся в обменных процессах (Саванина и др., 1999). Примером может служить *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl., которая накапливает Au³⁺ (Карамушка и др., 1995). Водоросли способны адаптироваться к ионам металлов (Божков, Могилянская, 1996; Котинский, 2001), однако их устойчивость к высоким концентрациям последних вследствие токсического действия мало изучена.

© Е.И. Шнюкова, 2005

Токсичность тяжелых металлов в основном исследована на представителях *Chlorophyta* и значительно меньше на *Cyanophyta*. Имеются сведения об аккумуляции зелеными водорослями отдельных тяжелых металлов, влияния на этот процесс факторов среды, а также о некоторых механизмах их поглощения (Горюнова и др., 1984; Голтвянский, 2002). Чувствительность водорослей, в том числе *Cyanophyta*, к токсикантам зависит от концентрации металлов в среде (Волошко, Гаврилова, 1992).

Предполагается, что зеленые морские макрофиты *Ulva* и *Enteromorpha* могут быть биоиндикаторами загрязнения воды тяжелыми металлами, при этом отмечается корреляция между содержанием металлов у макроводорослей и в седиментах (Vilares et al., 2001). Поскольку данные, освещающие способность *Cyanophyta* поглощать ионы металлов, весьма ограничены и мало исследованных в этом отношении видов, на сегодняшний день сведений о количественной оценке их накопления недостаточно.

Целью данной работы было изучить аккумуляцию ионов металлов и других микроэлементов из их смеси, что характерно для природных экосистем, прокариотической гормогониевой синезеленой водорослью *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flach., способной продуцировать экзополисахариды.

Материалы и методы

Исследовали альгологически чистую культуру *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flach., шт. 102 (*Cyanophyta*) из коллекции отдела мембранологии и фитохимии Ин-та ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины (IBASU-B). *N. linckia* был выделен нами из засушливого южного склона «Эволюционного каньона» (Нахал Орен, Национальный парк Маунт Кармель, Израиль), который подвергался действию высокой инсоляции.

Эксперименты проводили с культурой, выращенной на нитратном источнике азота, что, по нашим данным, обеспечивает активное продуцирование экзополисахаридов (Шнюкова и др., 2002). Водоросли высевали в стерильных боксах, выращивали в культуральном блоке в колбах емкостью 0,5 л с 350 мл простерилизованной питательной среды Фитцджеральда (Судьина, Шнюкова, 1991), освещая люминесцентными лампами ЛБ-40 (интенсивность на поверхности культуры 2500-3000 лк) при фотопериоде 12 ч и температуре 25-27 °С.

Исследовали поглощение клетками *N. linckia* ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , Sr^{2+} , а также Se^{4+} при их совместном действии. Для определения сорбции указанных ионов использовали водоросли, находящиеся на стационарной фазе роста со сформированными слизистыми чехлами, содержащими экзополисахариды. Опыты проводили также с препаратами экзополисахаридов, выделенных из биомассы водорослей (продолгованно выращенных в течение трех месяцев) с варьированием условий их периодической подкормки питательной средой Фитцджеральда и увлажнением по мере обезвоживания культуры. Это позволило достичь гиперпродуцирования слизи, обогащенной экзополиозами. Из этой биомассы выделяли экзополисахариды слизистых чехлов по известной методике (Методы ..., 1982).

Исследуемые образцы инокулировали в инкубационную смесь, содержащую заранее внесенные в дистиллированную воду растворы солей, которые использовали как источники указанных выше ионов: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,

$\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Na_2SeO_3 . Конечная концентрация каждой соли составляла 15 мг/л. Контролем служили соответствующие образцы, инокулируемые в дистиллированную воду без указанных солей. Инкубация длилась 40 ч. После центрифугирования осадки многократно отмывали от инкубационного раствора дистиллированной водой, высушивали и озоляли. Количество концентрации меди, цинка, стронция и селена определяли с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного метода (XRF). В каждом образце определяли исходное количество Cu^{2+} , Zn^{2+} , Sr^{2+} , а также Se^{4+} (фоновое содержание ионов) и их пул после экспозиции.

Результаты и обсуждение

Показано, что фоновое содержание ионов на стационарной фазе роста культуры *N. linckia*, продуцирующего экзополисахариды слизистых чехлов, составляло (% сух. массы): $\text{Cu}^{2+} - 3 \times 10^{-3}$, $\text{Zn}^{2+} - 7,6 \times 10^{-2}$, $\text{Sr}^{2+} - 1,6 \times 10^{-2}$, $\text{Se}^{4+} - 3,0 \times 10^{-3}$, т. е. наибольшей была фоновая доза Zn^{2+} , несколько меньшей – Sr^{2+} . Фоновый пул Cu^{2+} и Se^{4+} был на порядок ниже. При икубации водорослей с указанными ионами происходило их связывание клетками трихомов и экзополисахаридами слизистых чехлов *N. linckia*. При этом в биомассе наблюдалось увеличение пула исследованных ионов металлов и селена (табл. 1). Коэффициенты их накопления, т. е. отношение постэкспозиционного содержания ионов к фоновому у культуры, находящейся на стационарной фазе роста, составляли: $\text{Cu}^{2+} - 10,66 \times 10^2$; $\text{Sr}^{2+} - 1,56 \times 10^2$; $\text{Se}^{4+} - 1,20 \times 10^2$; $\text{Zn}^{2+} - 0,58 \times 10^2$. Следовательно, наибольшим этот коэффициент был при поглощении Cu^{2+} , несколько меньшим при аккумуляции Sr^{2+} и Se^{4+} и наименьшим в случае Zn^{2+} .

Таблица 1. Сорбция ионов некоторых тяжелых металлов и селена из их смеси культурой синезеленой водоросли *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flah. на стационарной фазе роста

Показатели	Ионы			
	Cu^{2+}	Zn^{2+}	Sr^{2+}	Se^{4+}
Источник ионов	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Na_2SeO_3
Исходная сухая масса, г/л инкубационной смеси	0,6975	0,6975	0,6975	0,6975
Фоновое содержание ионов, мг/г сухой массы	0,003	0,076	0,016	0,003
Постэкспозиционное содержание ионов, мг/г сухой массы	3,200	4,400	2,500	0,360
Количество сорбированных ионов:				
мг/г сухой массы,	3,197	4,324	2,484	0,357
мг/л инкубационной смеси,	2,229	3,016	1,733	0,249
% исходного содержания в инкубационной смеси	58,27	90,82	35,82	3,63
Количество несорбированных ионов:				
мг/л инкубационной смеси;	1,596	0,305	3,105	6,606
% исходного содержания в инкубационной смеси	41,73	9,18	64,18	96,37

Фоновое содержание ионов в препаратах экзополисахаридов, экстрагированных из длительно выращиваемой культуры, за исключением Sr^{2+} , было ниже, чем в биомассе *N. linckia*, находящейся на стационарной фазе роста. Несколько ниже в препаратах экзополисахаридов был также постэкспозиционный пул ионов. Коэффициенты их накопления препаратами экзополисахаридов были выше у $\text{Cu}^{2+} - 9,3 \times 10^2$, чем у $\text{Se}^{4+} - 1,7 \times 10^2$, $\text{Zn}^{2+} - 0,89 \times 10^2$ и $\text{Sr}^{2+} - 0,77 \times 10^2$.

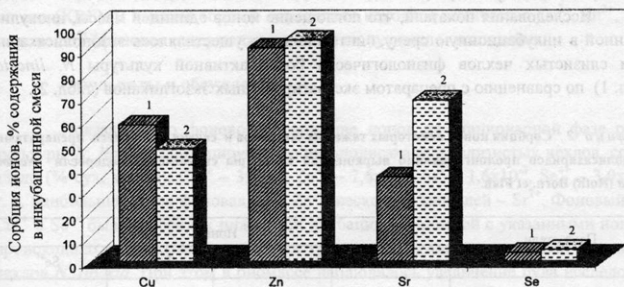
Исследования показали, что поглощение ионов единицей массы, инокулированной в инкубационную среду, интенсивнее осуществлялось экзополисахаридами слизистых чехлов физиологически более активной культуры *N. linckia* (табл. 1) по сравнению с препаратом экстрагированных экзогликанов (табл. 2).

Таблица 2. Сорбция ионов некоторых тяжелых металлов и селена из их смеси препаратами экзополисахаридов пролонгировано выращенной культуры синезеленой водоросли *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flah.

Показатели	Ионы			
	Cu^{2+}	Zn^{2+}	Sr^{2+}	Se^{4+}
Источник ионов	$\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{SrCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$	Na_2SeO_3
Исходная сухая масса, г/л инкубационной смеси	1,977	1,977	1,977	1,977
Фоновое содержание ионов, мг/г сухой массы	<0,001	0,018	0,022	0,001
Постэкспозиционное содержание ионов, мг/г сухой массы	0,930	1,600	1,700	0,170
Количество сорбированных ионов:				
мг/г сухой массы,	0,929	1,582	1,678	0,169
мг/л инкубационной смеси,	1,837	3,127	3,317	0,334
% исходного содержания в инкубационной смеси	48,03	94,16	68,56	4,87
Количество несорбированных ионов:				
мг/л инкубационной смеси,	5,018	0,194	1,520	6,521
% исходного содержания в инкубационной смеси	51,97	5,84	31,44	95,13

Количество сорбированных ионов меди, цинка, стронция и селена в совместном присутствии относительно их концентрации в инкубационной среде было различным. Водоросли, достигшие стационарной фазы роста, наибольшую аккумуляционную способность проявляли по отношению к цинку, связывая 90,82% его количества в инкубационной смеси. Аналогичный показатель для меди составлял 58,27%, стронция – 35,82% и наименьшим был при анализе сорбции селена – 3,63 % (см. табл. 1, рисунок). Низкий уровень поглощения селена биомассой, экзополисахариды которой содержали анионные группы, можно объяснить тем, что радикал, в состав которого входил селен (SeO_3^{2-}), также имел анионную природу.

Препарат экзополисахаридов, так же как и экзополисахариды культуры, достигшей стационарной фазы роста, наибольшую сорбирующую способность проявляли относительно цинка – 94,16% исходной его концентрации в инкубационном растворе. Меньшим было поглощение экзогликанами меди – 48,03%, что, вероятно, объясняется ее высокой токсичностью (см. табл. 2, рисунок).



Сорбция меди, цинка, стронция и селена из их смеси культурой синезеленой водоросли *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flach. (1) и препаратом экзополисахаридов (2).

Интересно, что препарат экзополисахаридов проявлял высокую сорбирующую способность по отношению к стронцию, аккумуляция которого достигла 68,56% исходного количества иона этого металла, что в 1,64 раза превышало его аккумуляцию культурой, достигшей стационарной фазы роста (см. табл. 2). Наиболее высокая аккумуляция цинка водорослями по сравнению с другими испытанными ионами, возможно, объясняется его меньшей токсичностью, что показано, в частности, на примере хлорококковой водоросли *Scenedesmus quadricauda* Turp. (Bréb.) (Горюнова и др., 1996).

Установленные отличия в сорбции ионов исследованных металлов и селена при их присутствии в смеси позволяют построить такие сорбционные ряды: водоросли со слизистыми чехлами, содержащими экзополисахариды, на стационарной фазе роста культуры – $Zn > Cu > Sr > Se$; препарат экзополисахариды пролонгированно выращенной культуры – $Zn > Sr > Cu > Se$.

Полученные данные свидетельствуют о том, что создание условий более активного продуцирования экзополисахаридов слизистых чехлов, объем которых существенно превышает массу трихомов, способствует повышению сорбционной способности цинка и особенно стронция. Степень аккумуляции последнего препаратом экзополисахаридов существенно возрастает от 35,82 до 94,16%. Вероятно, это может быть следствием изменений химического состава экзополисахаридов при длительном формировании объемных слизистых чехлов, в частности, при увеличении количества свободных анионных групп, способных избирательно связывать ионы металлов.

Эффекты комбинированного действия металлов связаны с аддитивностью (Плеханов и др., 1990). Тяжелые металлы и их смеси тормозят и нарушают рост хлорококковой водоросли *Scenedesmus quadricauda*. Наиболее значительные эффекты наблюдались при действии парных комбинаций цинка, кадмия и кобальта, а также при смеси трех металлов. Наименее токсичным был цинк (Горюнова и др., 1996). Это может быть одним из объяснений полученных нами результатов высокой аккумуляционной способности *Nostoc linckia* относительно смеси цинка, меди, стронция, а также селена, суммарное действие которых способствует адаптации водорослей к данным условиям. При этом наблюдается конкуренция ионов относительно отрицательно заряженных функциональных групп экзополисахаридов. Аналогичные данные получены при изучении одновременного внесения в питательную среду ионов иода в определенных соотношениях с ионами кобальта. Это содействовало адаптации клеток *Spirulina platensis* к высоким концентрациям иода, а также повышало ее иодаккумулялирующую способность, что позволяло получать подосодержащую биомассу спироулины с контролируемым содержанием биологически активных веществ (Котинский, 2001).

У микроорганизмов функционирует несколько механизмов, обуславливающих их устойчивость к тяжелым металлам (Таширев, 1995). Предполагается, что поглощение металлов происходит за счет физико-химической сорбции компонентами клеточных стенок. Кроме того, связывание ионов металлов может осуществляться внеклеточными белками, экзополисахаридами и другими экзометаболитами. Экзопалисахариды связывают ионы металлов, образуя мало токсичные продукты, и тем самым защищая водоросли от токсичных соединений. Показано, например, что биопленка, в которой доминировала синезеленая водоросль *Oscillatoria* sp., синтезировала экзополисахариды, связывающие ряд металлов: селен, кадмий, цинк, кобальт, марганец, свинец, хром, мышьяк, железо (Bender et al., 1994).

Поглощение ионов тяжелых металлов из среды может осуществляться как пассивно – путем диффузии по концентрационному градиенту, так и активно – против градиента, с затратами энергии при помощи переносчиков. Констатированное нами поглощение *N. linckia* исследованных ионов, вероятно, связано как с их пассивным накоплением, которое происходит лишь в первые минуты контакта, так и с их активной аккумуляцией, продолжительность которой измеряется часами.

Анализируя высокие показатели поглощения исследуемых ионов, необходимо принять во внимание, что в естественных условиях их аккумуляция, как правило, бывает ниже, чем в лабораторных экспериментах. В водоемах в присутствии сильно хелатирующих органических лигандов – естественных (гумусовые, аминокислоты, полипептиды, пирокатехин, фруктоза) и искусственных (ЭДТА) происходит спонтанное образование комплексных соединений тяжелых металлов (Саванина и др., 1999). Увеличение комплексобразующей способности среды снижает аккумуляцию металлов микроводорослями, поскольку металлы более доступны в виде свободных ионов или неорганических комплексов. Например, такие органические соединения, как цистеин и ЭДТА снижают концентрацию меди в среде культивирования *Pseudomonas syringae* с 100 до 5 мкМ (Azenha et al., 1995). В то же время известны случаи, когда *Synechocystis* PCC 6803, *Plectonema boryanum*, *Chlorella* поглощают Sn в виде органических соединений, причем с увеличением молекулярной массы возрастает и активность накопления (Avery et al., 1993; Lowley, 1994).

Выводы

Синезеленая водоросль *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flach., продуцирующая экзополисахариды слизистых чехлов, является активным биоаккумулятором. В условиях культуры *N. linckia* способен аккумулировать из окружающей среды от 35,82 до 94,16% ионов металлов (меди, цинка, стронция) из их смеси.

Степень очистки водной среды от меди, цинка, стронция зависит от функционального состояния культуры (возраст, интенсивность пролиферации, активность продуцирования экзополисахаридов). Водоросли, которые находятся в активном состоянии на стационарной фазе роста и формируют слизистые чехлы, содержащие экзополисахариды, связывают 90,82% цинка, 58,27% меди, 35,82% стронция от их количества в инкубационной смеси.

Длительное выращивание культуры *N. linckia* способствует гиперпродуцированию слизистых экзополлиоз. Препарат этих экзополисахаридов интенсивно поглощает цинк (94,16%), стронций (68,56%), однако аккумулирует несколько меньше меди (48,03%) относительно содержания указанных ионов в окружающей среде.

Поглощение селена, который был в составе анионного радикала (SeO_3^{2-}), как биомассой *N. linckia* со слизистыми чехлами, содержащими экзополисахариды, так и препаратом экстрагированных экзополлигоканов оказалось значительно меньшим (до 5%), чем аккумуляция ионов металлов. Однако поскольку использование селена в медицинской практике в настоящее время существенно возросло, способность *N. linckia* аккумулировать этот микроэлемент также заслуживает внимания, поскольку появляется возможность получать обогащенную селеном биомассу.

Сравнительное исследование поглощения ионов металлов (меди, цинка, стронция) и селена культурой *N. linckia* со слизистыми чехлами, содержащими экзополисахариды, и препаратом экстрагированных экзополлиоз указывает на их близкие поглотительные способности. Это свидетельствует о доминирующей роли экзополисахаридов в аккумуляции указанных металлов и селена из окружающей среды.

E.I. Shnyukova

N.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine,
2, Tereshchenkovskaya St., 01001 Kiev, Ukraine

ACCUMULATION OF METAL IONS BY EXOPOLYSACCHARIDES OF *NOSTOC LINCKIA* (ROTH) BORN. ET FLACH. (CYANOPHYTA)

This research deals with the accumulation of ions from metals (Cu, Zn, Sr) and Se from the environment by the prokaryotic homogonic blue-green alga *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flach. able to actively synthesize exopolysaccharides and also by the preparations of isolated exopolysaccharides. A degree of aquatic environment purification from metal ions depends on the functional state of the culture (age, intensity of proliferation, activity of exopolysaccharide production). Under conditions of culture *N. linckia* is able to accumulate from 35.82% to 94.16% ions of Cu, Zn, Sr from the environment. Exopolysaccharides play dominating

role in the accumulation of the mentioned metals and Se from the environment that is associated with their anionic nature.

К е у в о р д с : *Cyanophyta*, exopolysaccharides, accumulation of metal ions.

- Божков А.И., Могиллянская С.М. Адаптация *Dunaliella viridis* Teod. к различным концентрациям сернистой меди. Роль системы экскреции ионов меди в среду // Альгология. – 1996. – 6, № 2. – С. 122-132.
- Волошко Л.Н., Гаврилова О.В. Чувствительность *Synechocystis aquatilis* Sauv. (*Cyanophyta*) к ионам цинка // Там же. – 1992. – 2, № 1. – С. 77-80.
- Голтвянский А.В. Біоаккумуляція іонів металів клітинами зелених водоростей та одержання біомаси, багатой на мікроелементи: Автореф. дис. канд. біол. наук. – К., 2002. – 18 с.
- Горюнова С.В., Максимов В.Н., Плеханов С.Е. Поглощение и выделение тяжелых металлов микроводорослями в зависимости от их физиологического состояния // Науч. докл. высш. шк. Биол. науки. – 1984. – № 2. – С. 67-71.
- Горюнова С.В., Максимов В.Н., Плеханов С.Е. Поглощение смесей цинка, кадмия и кобальта водорослями *Scenedesmus quadricauda* // Вест. Моск. ун-та. Сер. 16. Биология. – 1996. – № 1. – С. 54-60.
- Карамушка В.И., Грузина Т.Г., Ульберг З.Р. Акумуляція золота (III) клетками цианобактерии *Spirulina platensis* // Микробиология. – 1995. – 64, № 2. – С. 192-196.
- Котинський А.В. Розробка технології одержання водовмісної біомаси спіруліни в закритих умовах культивування: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. – К., 2001. – 20 с.
- Методы изучения микробных полисахаридов / Под ред. И.А. Захаровой, Л.В. Косенко. – Киев: Наук. думка, 1982. – 192 с.
- Пирог Т.П. Біологічні функції мікробних екзополісахаридів // Мікробіол. журн. – 2001. – 63, № 5. – С. 80-101.
- Плеханов С.Е., Жалдаков И.А., Максимов В.Н. Характеристика роста и эффективность первичных процессов фотосинтеза культуры *Scenedesmus quadricauda* при действии цинка, кобальта и кадмия // Вест. Моск. ун-та. Сер. 16. Биология. – 1990. – № 3. – С. 68-73.
- Саванина Я.В., Лебедева А.Ф., Гусев М.В. Способность цианобактерий и микроводорослей к накоплению тяжелых металлов и возможность их использования для очистки водной среды // Там же. – 1999. – № 1. – С. 3-11.
- Сакевич А.И. Выделение и реассимиляция метаболитов водорослей // Альгология. – 1998. – 8, № 2. – С. 178-184.
- Судына Е.Г., Шнюкова Е.И. IBASU-B – коллекция культур микроводорослей отдела биохимии Ин-та ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины // Каталог культур микроводорослей в коллекциях СССР. – М.: Ин-т физиол. раст. РАН, 1991. – С. 145-151.
- Таширев А.Б. Взаимодействие микроорганизмов с металлами // Микробиол. журн. – 1995. – 57, № 2. – С. 95-101.
- Усенко Е.В., Божков А.И. Влияние тяжелых металлов на динамику роста и функциональную активность генетического аппарата *Chlorella vulgaris* // Биол. науки. – 1991. – № 3. – С. 69-76.
- Шнюкова Е.И. Экзополисахариды *Cyanophyta* // Альгология. – 2002. – 12, № 1. – С. 34-48.
- Avery S.V., Codd G.A., Cadd G.M. Biosorption tributyltin and other organotin compounds in cyanobacteria and microalgae // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 1993. – 39. – P. 812-817.
- Azenha M., Vasconcelos M.T., Cabral J.P.S. Organic ligands reduce copper toxicity in *Pseudomonas syringae* // Environ. Toxicol. Chem. – 1995. – 14, N 3. – P. 369-373.

- Bender J., Rodriguez-Eatot S., Ekanemesang U.M., Phillips P. Characterization of metal-binding biofloculants produced by the cyanobacterial component of mixed microbial mats // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1994. – 60, N 7. – P. 2311-2315.
- Drews G., Weckesser J. Function, structure and composition of cell walls and external layers // *The biology of cyanobacteria*. V. 19 / Ed. N.G. Carr, B.A. Whitton. – Oxford etc.: Black. Sci. Publ., 1982. – P. 333-357.
- De Philippis R., Vincenzini M. Exocellular polysaccharides from cyanobacteria and their possible application // *FEMC Microbiol. Rev.* – 1998. – 22, N 3. – P. 151-175.
- Fisher M., Gokhman I., Pick U., Zamir A. A structurally novel transferrin-like protein accumulated in plasma membrane of the unicellular green alga *Dunaliella salina* grown in high salinities // *J. Biol. Chem.* – 1997. – 272, N 3. – P. 1565-1570.
- Harris P.O., Ramelow G.J. Binding of metal ions by particulate biomass derived from *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* // *Environ. Sci. Technol.* – 1990. – 24, N 2. – P. 220-228.
- Lowley D.R. Biomediation of organic and metal reduction // *J. Ind. Microbiol.* – 1994. – 14, N 2. – P. 85-93.
- Painter T.J. Algal polysaccharides // *The polysaccharides* / Ed. G.O. Aspinnall. – New York: Acad. Press, 1983. – Vol. 2. – P. 195-285.
- Vilares R., Puente X., Carballeira A. *Ulva* and *Enteromorpha* as indicators of heavy metal population // *Hydrobiologia*. – 2001. – 462, N 1-3. – P. 221-232.

Получена 06.03.04

Подписал в печать А.И. Божков