

8. Рябушко Л.И. Атлас токсичных микроводорослей Черного и Азовского морей. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. 2003.
9. Садчиков А.П. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М., 2003.
10. Apeldoorn M.E., Egmond H.P., Speijers G.J.A. et al. Toxins of cyanobacteria. *Mol. Nutr. Food Res.* 2007, 51: 7-60.
11. Jungblut A.D., Neilan B.A. Molecular identification and evolution of the cyclic peptide hepatotoxins, microcystin and nodularin, synthetase genes in three orders of cyanobacteria. *Arch. Microbiol.* 2006, 185(2): 107-114.
12. Komárek J., Anagnostidis K., Cyanoprokaryota I. Chroococcales. Cyanoprokaryota. II. Oscillatoriales. *Süßwasserflora von Mitteleuropa.* 19(1)-19(2). Jena, Heidelberg, 1998.
13. OECD. Emerging Risks to Water Supplies: Best Practice for Improved Management and Preparedness to protect Public Health. 2005. Available at www.oecd.org/sti/biotechnology.
14. Sivonen K. Cyanobacterial toxins. *Encyclopedia of microbiology.* (Ed. M. Schaechter). Oxford: Elsevier, 2009.
15. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality Vol. 1 Third edition. WHO. Geneva, Switzerland, 2004.

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2018

В.И.Капков, С.Г.Васильева, Е.С.Лобакова

СУКЦЕССИИ ЦИАНОБАКТЕРИЙ В ВОДОЕМАХ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

В экспериментах *in situ* исследовались сезонные сукцессии цианобактерий, вызывающих «цветение» воды в водоемах бореальной зоны в зависимости от экологических факторов. Установлено, в планктонную стадию развития основными факторами, обуславливающими рост и смену доминирующих форм цианобактерий, являются температура воды, уровень солнечной радиации и выделяемые метаболиты. Наиболее выраженные «цветения» воды с высоким накоплением биомассы и вторичных токсичных метаболитов цианобактерий наблюдаются в годы с антициклональным типом погоды. В такие годы цианобактерии проявляют максимальный рост благодаря выработанному в процессе эволюции сочетанию адаптивных признаков, комбинации которых отсутствуют у партнеров по планктонному сообществу или встречаются лишь по отдельности. Вероятно, что способность цианобактерий занимать различные биотопы в результате высокой устойчивости к климатическим факторам и ожидаемое глобальное потепление будут стимулировать более продолжительные и токсичные «цветения» воды в водоемах бореальной зоны.

Журн. микробиол., 2018, № 4, С. 100—107

Ключевые слова: цианобактерии, «цветение» воды, сукцессии, экологические факторы, метаболиты, глобальное потепление

V.I.Kapkov, S.G.Vasilieva, E.S.Lobakova

SUCCESSION OF CYANOBACTERIA IN BOREAL WATERS

Lomonosov Moscow State University, Russia

The *in situ* investigation of cyanobacterial seasonal succession, causing algal «blooms» in boreal waters, and its dependence on ecological factors was fulfilled. It was revealed that the most important abiotic factors promoting the growth and changes of dominant species in populations are the water temperature, the level of solar radiation and content of cyanobacterial metabolites. The most profound «blooming» with highest biomass and toxic metabolites accumulation occurs during anticyclone type of weather. During such periods cyanobacteria are the most prevalent

cultures due to the combination of adaptive mechanisms acquired in evolutionary process which other partners of planktonic community lacked or deprived. It was hypotized that the global warming and cyanobacteria ability to inhabit different biotopes due to environmental tolerance would result in more profound and prolonged «blooming» of boreal waters.

Zh. Mikrobiol. (Moscow), No. 4, P. 100—107

Key words: cyanobacteria, algal blooms, succession, ecological factors, metabolites, global warming

ВВЕДЕНИЕ

В водоемах бореальной зоны наблюдаются повторяющиеся из года в год сезонные сукцессии планктона, которые выражаются в появлении, кроме весеннего и осеннего, летнего максимума за счет массового развития цианобактерий (Цб) родов *Dolichospermum* (=Anabaena) — *Aphanizomenon* — *Microcystis*. В годы с антициклональным типом погоды при повышенном уровне солнечной радиации существенно увеличивается биомасса популяций Цб и доля токсичных «цветений» воды [21]. Резкие «вспышки» численности и доминирование Цб в эвфотической зоне сопровождается снижением видового разнообразия планктонного сообщества.

Планктонные стадии развития Цб привлекают внимание исследователей в связи с участвовавшими в последнее время случаями отравления водной среды токсичными метаболитами, выделяемыми Цб прижизненно и после разрушения клеток [7, 14]. Следует подчеркнуть, что «цветение» вызывают обычно нитчатые или колониальные формы с высокой удельной поверхностью клеток (S/V), с хорошо развитыми поверхностными структурами (слизистые чехлы, капсулы). Обычно это теплолюбивые организмы, более требовательные к температуре воды, чем к уровню освещенности, с относительно высокой скоростью деления клеток, устойчивые к поеданию организмами зоопланктона из-за слизистых поверхностных структур, с большим запасом фосфора в клетках, аккумулированного во время бентосной стадии развития и потенциальной способностью увеличивать рост популяции за счет покоящихся вегетативных спор.

К числу наиболее распространенных видов, вызывающих токсичные «цветения» относятся *Dolichospermum flos-aquae* (Lyngb.) Breb.ex Born.et Flah. Wackl.Hoffm. (Syn.: *Anabaena flos-aquae* Elenk.), *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs, *Microcystis aeruginosa* f. *aeruginosa* Elenk. и *M.aeruginosa* f. *flos-aquae* (Wittr.) Elenk. Среди вторичных метаболитов, продуцируемых этими видами наиболее опасными для гидробионтов и человека являются алкалоиды-нейротоксины (анатоксин-а, анатоксин-а(s), гомоанатоксин-а) ингибиторы ацетилхолинэстеразы и сакситоксин — блокатор натриевых каналов клетки. Не меньшую опасность представляют циклические пептиды — гепатотоксины (микроистины) — ингибиторы протеинфосфатаз и обладающие также канцерогенными свойствами. Некоторые Цб синтезируют низкомолекулярные физиологически активные вещества: криптофицин, микровиридин, эругинозин, анабенопептины, микрогинины и другие метаболиты, которые регулируют рост собственной популяции во время «цветения», а также ингибируют развитие водорослей, беспозвоночных и рыб [10, 19].

Планктонные Цб демонстрируют широкую экофизиологическую адаптацию к изменяющимся условиям среды и способность давать «вспышку» чис-

ленности практически во всех водных экосистемах. Они заняли практически все экотопы, вступая в симбиотические отношения с микро- и макроводорослями, беспозвоночными животными, грибами и высшими растениями. В свою очередь, в клетках Цб обитают цианофаги, а на поверхности гетероцист — бактерии [15]. Максимальный рост Цб в водоемах, вызывающих «цветение» воды, осуществляют в составе альгобактериальных ассоциаций [18].

До настоящего времени остаются неясными основные экологические факторы, обуславливающие активный рост Цб во время «цветения» водоемов. Поэтому выяснение особенностей развития потенциально токсичных Цб в природных экосистемах будет способствовать выяснению роли приоритетных экологических факторов, влияющих на уровень «цветения» и, соответственно, на синтез метаболитов с различной физиологической активностью. Эксперименты *in situ* помогут разработать также способы управления ростом популяций Цб как в условиях естественного местообитания, так и при использовании их в лабораторных опытах.

В этой связи, нами была предпринята попытка исследования цикла развития и структуры популяции возбудителей «цветения» воды *D. flos-aquae*, *Aph. flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa* в водоемах бореальной зоны в зависимости от основных экологических факторов, определяющих массовое развитие этой ЦБ в планктонном сообществе.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на водохранилищах Можайском (55°02'18" с.ш., 37°45'20" в.д.) и Canyon Ferry Lake (46°30'23" с.ш., 111°36'24" з.д., Montana, USA) летом 2010-2014 годов. Пробы планктона отбирали в полдень батометром Рутнера объемом 2 л с различных горизонтов в разных точках водоема в течение вегетационного периода. Часть пробы фиксировали раствором Люголя с добавлением формалина и ледяной уксусной кислоты и концентрировали методом обратной фильтрации. Вторую часть пробы последовательно фильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 5 и 1,2 мкм для последующего измерения линейных параметров клеток. Количество ЦБ в пробах просчитывали под микроскопом в камере Нажотта объемом 0,05 см³. Биомассу находили расчетным методом, приравнивая форму клеток к объему соответствующей геометрической фигуры и принимая в расчет, что 10³ мк³ составляет 0,001 мг сырой массы. Биомассу мелких колониальных видов определяли по количеству хлорофилла, принимая в расчет содержание хлорофилла «а» в сухом веществе равным 2,5% [9]. Пигменты экстрагировали 90% водным раствором ацетона при 4 °С в условиях затемнения после разрушения клеток в стеклянном гомогенизаторе. Содержание феофитина «а» определяли по изменению оптической плотности вытяжки пигментов при 430, 665 и 750 нм, добавляя в кювету 0,1 мл 0,1 N соляной кислоты после измерения хлорофилла. Концентрацию фосфатов и нитратов в воде определяли методом ионной хроматографии высокого разрешения (НРИС). Электронные импульсы регистрировали с помощью интегратора Perkin Elmer LCI-100. Температуру воды на разных глубинах водоема измеряли с использованием электродных датчиков. Прозрачность воды определяли по диску Секки. Статистическую обработку данных проводили с использованием программ «Microsoft Exel» и «STATISTICA» 5.0 for Windows.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Цианобактериальному «цветению» изученных водоемов всегда предшествовало доминирование в планктоне эвфотической зоны диатомовых водорослей *Asterionella formosa* Hass., *Fragilaria crotonensis* Ritt. *Navicula digitoradiata* (Greg.) A.S., развитие которых приводило к существенному снижению запасов в воде основных биогенных элементов, особенно азота и фосфора.

В период весенней гомотермии поднятые со дна конвективными потоками проросшие акинеты и гетероцистосодержащие трихомы Цб длиной 50–70 мк в большом количестве обнаруживались в планктонных пробах. Интенсивный рост численности и прирост биомассы *D. flos-aquae* наблюдался в начале лета с прогревом поверхностного слоя воды до 16–18 °С и снижением в ней концентрации нитратов в 2, а фосфатов — в 1,5 раза (табл. 1).

На фоне лимитированного содержания в воде азота и фосфора преимущество в росте получали популяции диазотрофных миксотрофных Цб с высокой скоростью деления клеток в трихомах. Высокая степень приспособленности к дефициту биогенных элементов у Цб IV субсекции связана со способностью использовать для роста как накопленный клетками в виде цианофициновых гранул (сополимер аргинина и аспарагиновой кислоты) резервный азот, так и фиксировать его в аэробных условиях специализированными клетками гетероцистами. Установлено, что для Цб характерно видовое предпочтение к определенным формам азота, что обеспечивает им последовательное доминирование при развитии в планктоне. Следует отметить, что при переходе с нитратного на аммонийный азот у *Aph. flos-aquae* возрастает эффективность использования энергии клетками [13]. Так, массовое развитие *D. flos-aquae* в водоеме сопровождается использованием нитратного азота, а рост *Aph. flos-aquae* — аммонийного азота. Эти виды Цб в цикле развития формируют специализированные спороподобные клетки акинеты, которые позволяют переживать им неблагоприятные условия. Акинеты являются транзиторной формой дифференциации клеток у Цб, и процесс их образования сопровождается накоплением большого количества связанного азота (цианофициновых гранул), фосфора в виде полифосфатов и гликогена. В связи с этим при благоприятной температуре они быстро могут перейти к массовому развитию. Определяющими в этом случае факторами массового развития Цб становятся абиотические факторы — температура воды и уровень солнечной радиации.

В стратифицированном водоёме в эвфотической зоне Цб получают конкурентное преимущество в росте по сравнению с другими организмами планктонного сообщества. Поэтому в начале лета в планктоне доминирует *D. flos-aquae* с невысоким требованием к интенсивности света и оптимальной температурой роста 16–18 °С. «Цветение» водоема, вызванное *D. flos-aquae*, продолжается

Таблица 1. Содержание соединений азота и фосфора в эвфотической зоне Canyon Ferry Lake (мкг/л) летом 2010 года

Биогенные элементы	Время отбора проб воды				
	20.04	20.05	20.06	20.07	20.08
NO ₃ ⁻	520,3±61,4	280,4±39,6	161,5±21,4	153,8±25,7	96,7±14,8
NH ₄ ⁺	240,5±32,3	210,4±30,4	375,6±41,5	563,1±71,4	190,8±28,6
PO ₄ ³⁻	61,8±11,3	50,7± 9,8	41,3± 8,5	35,5± 6,2	27,6± 5,4
P общий	168,4±22,5	152,2±23,1	136,8±18,0	120,7±16,3	128,6±15,7

около трех недель и заканчивается быстрым, в течение нескольких часов лизисом клеток. Причиной лизиса, по-видимому, является наличие в клетках ферментного комплекса, способного расщеплять пептидогликан клеточной стенки, который выделяется в среду во время разрушения клеточных оболочек [4], или наличием в составе популяции видоспецифического цианофага.

При старении популяции Цб в конце «цветения» одним из процессов автолиза клеток может быть также фотоокисление, которое сенсибилизируется хлорофиллом, поэтому на стадии стационарной фазы роста популяции, когда происходит деградация хлорофилла, сопровождающаяся разрушением мембран тилакоидов, происходит автолиз клеток [8]. Анализ проб на содержание фотосинтетических пигментов в конце фазы «цветения», когда биомасса фитопланктона на 85-90% была представлена Цб, показал уменьшение концентрации хлорофилла «а» в 3 раза по сравнению с пиком «цветения» на фоне увеличения доли феофитина «а» [5].

Некоторые вещества, выделяемые в среду после лизиса клеток доминирующего вида, могут быть использованы в качестве источника питания видами Цб, способными к мезотрофному типу обмена. В результате в планктонном сообществе создаются благоприятные условия для асинхронных сезонных сукцессий планктонных стадий Цб, когда лизис клеток одного вида создает среду для роста других Цб, которые приходят на смену ранее доминирующему «цветущему» виду.

С ростом солнечной радиации и дальнейшим прогревом воды до 20-22 °С преимущество в развитии получает *Aph. flos-aquae*, для роста которой необходима высокая интенсивность солнечного света, поскольку в процессе роста прямые или изогнутые длинные трихомы данной Цб собираются в довольно крупные пучки или клубки. Необходимо отметить, что период «цветения» воды, обусловленный интенсивным развитием *Aph. flos-aquae*, совпадает с началом развития одноклеточной Цб I субсекции условно токсичной Цб *M. aeruginosa*, колонии которой постоянно присутствовали в планктонном сообществе. Однако интенсивный рост популяции *M. aeruginosa* начинался лишь после спада развития *Aph. flos-aquae*. «Вспышка» численности *M. aeruginosa* приходится на начало августа, когда температура воды достигает 24-25 °С, а инсалиция начинает снижаться. Развитие популяций *M. aeruginosa*, как правило, сопровождалось подавлением роста *Aph. flos-aquae*, что, по-видимому, связано с выделением в среду *M. aeruginosa* метаболитов, подавляющих развитие *Aph. flos-aquae* (табл.2). Аналогичные сукцессии планктонных стадий развития Цб наблюдались во время «цветения» воды в Можайском, Рыбинском, Горьковском и других водохранилищах бореальной зоны, особенно в годы с антициклональным типом погоды [6, 7].

Таблица 2. Изменение биомассы Цб в период «цветения» воды в Саунон Ferry Lake в 2010 г. (мкг/м³ сух. в-ва)

Время отбора проб	<i>Dolichospermum flos-aquae</i>	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	<i>Microcystis aeruginosa</i>
15.06	270,2±24,7	—	—
20.06	632,4±51,6	—	—
25.06	941,6±62,3	80,5±9,6	—
30.06	1240,5±115,4	187,7±16,4	—
05.07	652,3±49,0	306,9±27,5	110,7±11,8
10.07	106,0±12,5	710,3±53,2	214,3±19,5
15.07	—	1130,4±120,0	253,1±21,4
20.07	—	1390,0±146,2	398,6±43,2
25.07	—	1505,6±138,8	593,5±54,0
30.07	—	1218,2±110,0	817,2±63,5
05.08	—	704,5±55,4	1045,3±82,4
10.08	—	275,8±26,3	1152,0±89,6
15.08	—	195,2±18,7	1230,5±120,8

Примечание. — Менее 50 мкг/м³

Данные виды Цб относятся к условно токсичным видам и способны синтезировать и накапливать в клетках разные группы токсических метаболитов. У *Aph. flos-aquae* обнаружен гепатотоксин — цилиндропермозин и два нейротоксина: анатоксин-а и гомоанатоксин-а; у *M. aeruginosa* из гепатотоксинов выявлены микроцистины и не обнаружен ни один из структурных вариантов нейротоксинов. Наиболее полный набор токсичных метаболитов синтезирует *D. flos-aquae*: гепатотоксины — микроцистин и цилиндропермозин, а среди нейротоксинов — анатоксин-а, гомоанатоксин-а, анатоксин-а (с) и сакситоксины [2].

При смене доминирующего вида происходит деградация клеток ранее «цветущего» вида, и в окружающую среду вместе с токсичными метаболитами выделяются соединения азота, фосфора и других биогенных элементов, которые служат питательными веществами для популяции следующего за ним вида Цб. Поэтому даже во время пика «цветения» воды в планктонном сообществе на протяжении сукцессии присутствовали другие виды, в том числе Цб, диатомовые водоросли и простейшие.

В это же время наблюдалось интенсивное спорообразование и переход «цветущего» вида Цб к бентосной стадии развития в иловых отложениях водоема, где акинеты могут находиться несколько месяцев и даже лет [9]. Таким образом, развитие планктонных стадий Цб в сообществе регулируется совокупностью абиотических и биотических факторов, каждый из которых популяция стремится использовать, регулируя рост собственной численности, поскольку каждая популяция в составе сообщества всегда стремится поддерживать оптимальную плотность, обеспечивающую существование вида в среде, созданной и партнерами по биотическому сообществу.

При этом три основные группы экологических факторов обуславливают эффективный рост популяций Цб, вызывающих «цветение» воды в планктонном сообществе. К первой группе относится антропогенное увеличение концентрации биогенных элементов, способствующее интенсивному «цветению» воды, повторяющееся из года в год в водоемах умеренной зоны в результате интенсивного роста Цб. Массовому развитию Цб способствуют также различные потребности планктонных стадий в разных формах азота и фосфора, а также способность *D. flos-aquae* к азотфиксации атмосферного азота и запасам в клетках полифосфатов [16, 20].

Вторая группа абиотических факторов, обуславливающая активный рост Цб, связана с высоким уровнем геомагнитной активности и солнечной радиации в годы с антициклональным типом погоды [3]. В такие годы существенно возрастает частота «вспышек» численности Цб на фоне резкого увеличения токсичных «цветений». При высоком уровне солнечной активности рост биомассы Цб сопровождается увеличением биосинтеза токсичных метаболитов [11, 12, 17].

Особый интерес представляет третья группа факторов, связанная с выделяемыми Цб во внешнюю среду метаболитами, которые выполняют в планктонном сообществе специфические функции: регулируют клеточный цикл и рост собственной популяции, особенно на конечной стадии «цветения», ингибируют развитие партнеров по сообществу, вызывая элиминацию чувствительных видов. Поскольку в водных экосистемах обмен информацией между особями популяции и межпопуляционные взаимоотношения происходят посредством метаболитов, выделяемых в окружающую среду, то рост численности отдельного вида Цб и последующее отмирание в конце «цветения» сопровождается резким выбросом в среду высоких концентраций вторичных токсичных соединений. В результате в планктонном сообществе происходит нарушение информационного поля, которое приводит к разбалансировке

связей между партнерами и последующему изменению структуры биотического сообщества и смене доминирующего вида [1, 6].

Доминирование отдельных видов в летнем комплексе планктонного сообщества происходит благодаря способности Цб осуществлять максимальный рост и обусловлено тем, что в процессе эволюции при формировании жизненных стратегий у них появились свойства, которые сложились в сложную комбинацию приспособительных признаков, каждый из которых у других видов в сообществе присутствует лишь по отдельности. В то же время, резкое увеличение численности и биомассы «цветущего» вида Цб нарушает функциональное равновесие в планктонном сообществе и упрощает его структуру, что вызывает обострение конкуренции между партнерами за ресурс в результате доминирования отдельных популяций.

Можно предположить, что прогнозируемое изменение климата в сторону глобального потепления будет способствовать более продолжительным и токсичным «цветениям» воды планктонными стадиями развития эндемных и космополитных видов Цб, включая и теплолюбивые виды Цб, ранее массово не развивавшихся в исследуемых регионах, таких, как *Cylindrospermopsis raciborskii* (Wolozynska) Seenaya et Subba Raju в результате инвазии из южных регионов, как это происходит в годы с антициклональным типом погоды в водоемах бореальной зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (соглашение № 14.616.21.0080).

ЛИТЕРАТУРА

1. Винберг Г.Г. Особенности водных экологических систем. Журн. общ. биол. 1967, 28(5): 538-545.
2. Волошко Л.Н., Плющ А.В., Титова Н.Н. Токсины цианобактерий (Cyanobacteria, Cyanophyta). Альгология. 2008, 18 (1): 3-20.
3. Девяткин В.Г., Клайн Б.И., Шихова Н.М. О связи некоторых экосистем Рыбинского водохранилища с активностью магнитного поля Земли. Биология внутренних вод. 2004, 2: 53-60.
4. Ермакова Л.Р., Никитина К.А., Гусев М.В. Возрастные изменения ультраструктуры клеток *Anabaena variabilis*. Микробиология. 1997, 46 (2): 324-328.
5. Капков В.И., Александер Г., Александер М. «Цветение» воды синезелеными водорослями в Каньоне Ферри Лейк. Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния природных вод. Ярославль., Изд-во РАН Борок, 1996.
6. Капков В.И., Лихачева Н.Е., Фёдоров В.Д. Функциональные стратегии синезеленых водорослей и «цветение» воды. Бюллетень МОИП. 2009, 114 (3): 411-417.
7. Корнева Л.Г., Соловьева В.В. Фитопланктон и содержание цианотоксинов в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах в период аномально жаркого лета 2010 года. Вода: химия и экология. 2014, 8: 24-29.
8. Погосян С.И. Состояние растительных организмов в природных условиях и окислительное повреждение фотосинтетического аппарата. Дис. д-ра биол. наук. М., 2003.
9. Сиренко Л.А. Физиологические основы размножения синезеленых водорослей в водохранилищах. К., Наук. думка, 1972.
10. Федоров В.Д., Капков В.И. Руководство по гидробиологическому контролю качества природных вод. М., Изд-во МГУ, 2000.
11. Carmichael W.W. The Cyanotoxins. Adv.Bot.Res. 1997, 27: 211-256.
12. Paerl H.W. Growth and reproductive strategies of freshwater blue-green algae. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge, Univ. Press, 1986.
13. Paerl H.W. Nutrient and other environmental controls of harmful cyanobacterial blooms along freshwater-marine continuum. Adv.Exp.Ved. Biol. 2008, 619: 216-241.
14. Paerl H.W., Huisman J. Climate change — Blooms like is hot. Science. 2008, 320: 57-58.
15. Pearl H.W., Huisman J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. Environmental Microbiology Reports. 2009, 1(1):27-37.

16. Reynolds C.S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status. *Hydrobiologia*. 1998, 369/370: 11-26.
17. Sivonen K. Cyanobacterial toxins and toxin production. *Phycologia*. 1997 (35): 12-24.
18. Stomp M., Huisman J., Voros L. et al. Colourful coexistence of red and green picocyanobacteria in lakes and seas. *Ecol. Lett.* 2007 (10): 290-298.
19. Skulberg O.M. Toxin produced by cyanophytes in Norwegian island waters — health end environment. Chemical data a basis of geomedical investigation. Oslo, Norv. Inst. Water Res., 1996.
20. Tilman D., Kiesling D., Sterner R. et al. Green, bluegreen and diatom algae: taxonomic difference in competitive ability for phosphorus, silicon and nitrogen. *Arch. Hydrobiol.* 1986, 106 (4): 473-485.
21. Wiedner C., Rucker J., Brüggemann R., Nixdorf B. Climate change affects timing and size of populations of an invasive cyanobacterium in temperate regions. *Oecologia*. 2007, 152: 437-484.

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2018

Т.Н.Шапиро¹, Г.А.Дольникова¹, Н.В.Немцева², Д.А.Санджиева³, Е.С.Лобакова¹

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОНСОРЦИУМА УГЛЕВОДОРОД ОКИСЛЯЮЩИХ БАКТЕРИЙ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

¹Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова; ²Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза, Оренбург; ³Российский государственный университет нефти и газа им. И.М.Губкина, Москва

Из реактивного топлива ТС-1 выделен консорциум микроорганизмов, каждый член которого способен последовательно деградировать разные фракции углеводородов. Изолировано и идентифицировано 5 штаммов окисляющих углеводород бактерий (УОБ). Определены их физиолого-биохимические особенности. Все штаммы проявляют положительную каталазную активность. Установлено, что все штаммы УОБ, продуцирующие экзогенные и эндогенные поверхностно активные вещества, способны к росту на средах с разными фракциями углеводородов. Изучение подобных ассоциаций позволяет создавать эффективные препараты для биоремедиации при ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

Журн. микробиол., 2018, № 4, С. 107—113

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, углеводород окисляющие бактерии, углеводороды, консорциум микроорганизмов

T.N.Shapiro¹, G.A.Dolnikova¹, N.V.Nemtseva², D.A.Sandzhieva³, E.S.Lobakova¹

IDENTIFICATION AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERIZATION OF A CONSORTIUM OF HYDROCARBON-OXIDIZING BACTERIA OF OIL AND OIL PRODUCTS

¹Lomonosov Moscow State University; ²Institute of Cellular and Intracellular Symbiosis, Orenburg; ³Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

A consortium of microorganisms were isolated from TC-1 fuel form, each member of which is capable of consistently degrade hydrocarbons' different fractions. The 5 strains of hydrocarbon-oxidizing bacteria (PSB) were identified and isolated from TS-1 jet fuel. Their physiological and biochemical features are defined. All strains exhibit positive catalase activity. It is determined that all UOB strains, producing exogenous and endogenous surfactants, are capable to growth on media with