

Оценка использования сточной воды в качестве питательной среды для накопления биомассы микроводорослей

© 2022. А. В. Гогонин, аспирант,
Т. Н. Щемелинина, к. б. н., с. н. с.,
Е. М. Анчугова, инженер-исследователь,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: tatyanakomi@mail.ru

В стоках предприятий целлюлозно-бумажной промышленности содержатся фенол, азотные соединения, сера, фосфор, ионы железа, алюминия, превышающие предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде водных объектов рыбохозяйственного значения. Одним из способов очистки сточной воды от поллютантов является использование микроводорослей. Инокулирование микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* в сточную воду АО «Монди СЛПК» приводит к снижению содержания основных загрязняющих веществ по сравнению с неочищенной сточной водой: азота аммонийного – на 74–79%, нитратного – на 42–44%, общего – на 55–72%, фосфора общего – на 25–50%, серы общей – на 6,4%, фенола – на 62–70%. Использование сточной воды целлюлозно-бумажного предприятия в качестве питательной среды для культивирования микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* является более эффективным по сравнению с синтетическими и полусинтетическими питательными средами.

Ключевые слова: сточные воды, загрязняющие вещества, микроводоросли, очистка сточной воды, питательная среда.

Utilization of wastewaters as a nutrient medium for the accumulation of microalgal biomass

© 2022. A. V. Gogonin ORCID: 0000-0003-1401-7412*
T. N. Shchemelinina ORCID: 0000-0002-4052-6424*
E. M. Anchugova ORCID: 0000-0002-7912-3518*
Institute of Biology of Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: tatyanakomi@mail.ru

Cultivating microalgae using wastewater nutrients is a potential approach to realize resource recovery that can contribute to circular economy. However, wastewaters discharged from pulp and paper mills contain high concentrations of stable components such as metal ions, phenols, nitrogen compounds, sulfur, phosphorus, that exceed quality standard values, that is why microalgae-based approaches are a solution to cope with wastewater treatment and simultaneous biomass accumulation. To address those problems, we investigated microalgal cultivation fed with nutrients from wastewaters, synthetic, and semi-synthetic media. This study employed the species of *Chlorella* genus adapted for technologies of algal ponds and stepwise bioprocessing approaches. Biotechnological properties of *Chlorella vulgaris* f. *globosa* strain were evaluated in a series of laboratory experiments testing a range of regimes and conditions. Results showed that *C. vulgaris* f. *globosa* grew well on both semi-synthetic Liuk's medium and synthetic conventional media because of its similar nutrient profile to a common algal growth medium, but wastewaters were found to be the most appropriate for scaling up of beneficial acclimatized biomass production. Microalgal inoculation affects the content of major pollutants while treating real wastewater of Mondi Syktyvkar JSC. Nutrients, metal ions, and other recalcitrant pollutants were effectively removed by this strain with removal efficiencies of 74–79% N-NH₄⁺, 42–44% N-NO₃⁻, 25–50% total phosphorus, 6.4% total sulfur, and 62–70% of phenols. After microalgal cells having been deposited and harvested, chemical parameters of the wastewater processed were in compliance with quality standards for fishery waterbodies. It might be useful, in a framework of further studies, to assess toxicity of the biomass harvested and its applicability for agriculture.

Keywords: wastewater, pollutants, microalgae, wastewater treatment, nutrient medium.

Одна из основных экологических проблем – загрязнение природных вод, в том числе сточными водами производственных предприятий [1]. Согласно отчёту, опубликованному Организацией Объединённых Наций в 2017 г., очищается только 20% сточных вод, в то время как остальные 80% сбрасываются без предварительной очистки, что наносит серьёзный ущерб [2].

Большая часть сточных вод загрязнена как органическими, так и неорганическими веществами, способными нарушать пищевые цепи и подвергать опасности жизнь водных обитателей [3, 4].

Биологическая очистка сточных вод, применяемая на большинстве промышленных предприятий [5], имеет перед другими методами ряд значительных преимуществ. Микроорганизмы осуществляют эффективное разложение в стоках органических загрязнителей до минеральных веществ.

Перспективным направлением биологической очистки сточных вод является использование микроводорослей [6–9], позволяющее, с одной стороны, осуществлять очистку воды, с другой стороны, – получать дешёвую биомассу, богатую белками, липидами, витаминами и др., которую впоследствии можно использовать для решения энергетических и сельскохозяйственных задач [10–15].

Актуальность исследования обусловлена решением проблемы очистки сточных вод лесопромышленных комплексов и целлюлозно-бумажных комбинатов для Российской Федерации, являющейся в настоящее время одной из приоритетных в сфере экологической биотехнологии, так как сточные воды данной отрасли содержат широкий перечень загрязнителей (фенолы, нитратный, нитритный, аммонийный азот, фосфаты, сульфаты, ионы металлов и пр.). Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ после очистки воды на станции биологической очистки достигаются не по всем показателям, и, как результат, вода на выходе оказывается недостаточно очищенной. Проблему может решить доочистка воды с помощью микроводорослей *Chlorella vulgaris* с одновременным накоплением их биомассы.

Chlorella – один из наиболее распространённых родов зелёных водорослей, менее уязвимый по отношению к загрязнителям, выдерживающий большие концентрации загрязнителей длительного воздействия, толерантен к перепаду температур, потребляет фенолы,

нитраты, фосфаты и сокращает количество бактерий и токсинов в воде [16–20].

Цель работы – оценка возможности со- вмещения процессов водоочистки сточной воды АО «Монди СЛПК» и культивирования биомассы микроводорослей.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования был взят штамм микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* IPPAS C-2024. Хлорелла чаще всего используется в технологиях водорослевых прудов, биоплато и проточных водоёмов для доочистки сточных вод [21, 22]. Относится к альфамезосапробионтным видам, способным выдерживать значительную степень органического загрязнения.

Биотехнологические свойства микроводорослей *C. vulgaris* f. *globosa* были проверены в модельных экспериментах. Условия и режимы культивирования микроводорослей *C. vulgaris* f. *globosa* IPPAS C-2024 сведены в таблицу 1.

Количественный химический анализ образцов сточных вод был выполнен следующими методами: определение кислотности, pH – потенциометрией; содержание общего азота, N_{общ.} – термодаталитическим окислением; содержание фосфат-, нитрат-, нитрит-ионов, ионов аммония, цветности – фотометрическим методом; Fe, Al, P_{общ.}, S_{общ.}, хлорид-ионов – атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой; фенола – капиллярной хроматографией; взвешенных веществ (ВВ) – гравиметрией.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли с применением *t*-критерия Уэлча для расчёта граничных значений доверительного интервала.

Результаты и обсуждение

Микроводоросли *C. vulgaris* f. *globosa* в качестве биотехнологических агентов. Исследована эффективность очистки сточной воды с использованием микроводорослей *C. vulgaris* f. *globosa* от основных загрязняющих веществ. Было проведено несколько биотехнологических экспериментов с использованием сточной воды аэротенков и вторичных отстойников с разным режимом и продолжительностью эксперимента, а также инокулированием штаммом с титром клеток 10⁴, 10⁵, 10⁶, 10⁸ кл./см³ (табл. 1). Микроводоросли *C. vulgaris* f. *globosa* значительно снижали

Таблица 1 / Table 1

Условия экспериментов, проведённых на сточной воде с использованием микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* IPPAS C-2024
Experiments carried out to treat wastewaters using microalgae *Chlorella vulgaris* f. *globosa* IPPAS C-2024

№ No.	Питательная среда Nutrient medium	Титр клеток, кл./см ³ Cell titer, cells/cm ³	Соотношение инокулята и общего объёма, об.% Inoculum to volume ratio, % v/v	Место отбора воды Wastewater sampling site	Условия эксперимента Experimental conditions	Время эксперимента, сутки Exposition, days
1	Среда Тамия Tamiya's medium	10 ⁸	1	аэротенки aerotanks	Компрессор Tetratex APS 400, освещение фитолампой OSRAM L 18W/77 Fluora, 550 лм Air pump Tetratex APS 400, phytolamp lighting OSRAM L 18W/77 Fluora, 550 lm	1
2	Среды Тамия и Люка / Tamiya and Liuk media	10 ⁸				1
3	Среда Люка Liuk's medium	10 ⁴ 10 ⁵ 10 ⁶				1
4		10 ⁸		вторичные отстойники secondary settling tanks		12
5	Среда Тамия Tamiya's medium	10 ⁸				1
6	Сточная вода Wastewater	10 ⁸				1
7	Wastewater	10 ⁸				12

Таблица 2 / Table 2

Эффективность очистки сточной воды с использованием микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa*, %
The efficiency of wastewater treatment using *Chlorella vulgaris* f. *globosa* microalgae, %

Снижение содержания основных загрязняющих веществ, % The removal of major pollutants, %					
NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{общ.} N _{tot.}	P _{общ.} P _{tot.}	S _{общ.} S _{tot.}	фенол phenol
74–79	42–44	55–72	25–50	6,4	62–70

токсический эффект фенола в воде и трансформировали соединения фосфора и азота (табл. 2).

Культивирование маточных культур микроводорослей *C. vulgaris*. Известно, что для культивирования микроводорослей используются различные питательные среды, например, синтетические среды Тамия и Болда [23]. Недостатками использования синтетических сред являются их высокая стоимость по сравнению с другими доступными субстратами, возможность инфицирования как стоковых растворов при хранении, так и большого объёма среды в процессе, а также низкая эффективность при массовом культивировании, так как скорость прироста биомассы на таких средах существенно ниже.

Среда Люка – полусинтетическая питательная среда, включающая в себя минеральный ионит «IonsorbTM», водопроводную воду и стабилизированный куриный помёт и об-

ладающая бактерицидными, фунгицидными и противовирусными свойствами. Она часто используется для культивирования микроводорослей в большом количестве в короткие сроки. Эта среда может использоваться вместо питательных сред Болда и Тамия [24].

Для масштабирования процесса получения биомассы экономически наиболее альтернативным решением является использование сточных вод, образовавшихся в результате хозяйственной деятельности АО «Монди СЛПК». При внесении маточной культуры микроводорослей в сточную воду, взятую из аэротенков, наблюдали снижение содержания ионов алюминия и железа, биотрансформацию фенолов и биоразложение соединений азота. При этом микроводоросли, маточная культура которых была получена на сточной воде (табл. 3), эффективнее снижали содержание алюминия, железа и общего азота.

Исходя из результатов исследований, можно сделать вывод, что сточная вода АО «Монди СЛПК» в качестве питательной среды не менее эффективна, чем синтетические и полусинтетические питательные среды для культивирования микроводорослей, и является более рентабельной для накопления инокулятов, адаптированных для очистки стоков лесопромышленного комплекса.

Получение биомассы в процессе культивирования микроводорослей на сточной воде отстаивников. Инокулирование суспензии микроводорослей в сточную воду приводит, с одной стороны, к интенсификации процессов очистки, а с другой, рост и развитие культуры предполагает насыщение накопленной биомассы макро- и микроэлементами. Удаление клеток микроводорослей из воды путём осаждения и фильтрации приводит к очищению сточной воды до нормативов ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [25]. В то же время, микроводоросли, обладая антисептическими свойствами [26, 27], обеззараживают сточную воду, и образуют биомассу, которая может быть использована в сельском хозяйстве для повышения плодородия почв, улучшения роста и развития растений [28].

Был поставлен эксперимент на определение накопления как питательных элементов в процессе культивирования биомассы микроводорослей на сточной воде вторичных отстаивников СБО АО «Монди СЛПК» (проба СВМ – сточная вода с микроводорослями), так и на исследование очистки стоков после осаждения и удаления клеток микроводорослей

(проба СВО – сточная вода после осаждения и удаления клеток микроводорослей). В качестве контроля использовали сточную воду без внесения микроводорослей (СВ).

При культивировании микроводорослей *C. vulgaris* на сточной воде отстаивников в процессе накопления биомассы за 12 сут происходило окисление аммонийного азота на 38%, нитритного азота – на 43% и трансформация фенола – на 58% (табл. 4) (проба СВМ). В биомассе наблюдалось накопление фосфатов, серы, кальция, небольшое увеличение содержания магния, калия, натрия. Культивирование биомассы микроводорослей в сточной воде, инокулированной микроводорослями (СВМ), повышало содержание меди, бария. Изменение содержания остальных исследованных элементов в пробе происходило в пределах погрешности метода (табл. 4).

После осаждения и удаления микроводорослей из сточной воды (проба СВО) происходило снижение содержания всех исследуемых элементов до норм ПДК согласно СанПиН 1.2.3685-21 (табл. 4). Осаждённая биомасса микроводорослей в дальнейшем может быть исследована на токсичность и возможность использования в сельском хозяйстве.

Выводы

1. Установлено, что при инокулировании в сточную воду АО «Монди СЛПК» микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* происходит снижение содержания основных загрязняющих веществ: фенола, соединений азота, серы, фосфора.

Таблица 3 / Table 3

Снижение содержания основных загрязняющих веществ в сточной воде, взятой из аэротенков при введении в неё штамма микроводорослей *C. vulgaris*, культивированного на разных средах, %
The reduction in the major pollutant content in aerotank wastewaters when inoculated with *C. vulgaris*, cultivated in different media, %

Среда Nutrient medium	Снижение содержания основных загрязняющих веществ, % The reduction in the major pollutant content, %					
	Al	фенол phenol	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	N _{общ.} N _{tot.}	Fe
Среда Тамия Tamiya's medium	34	35	28	3	5	25
Среда Люка Liuk's medium	34	50	29	19	5	24
Сточная вода Wastewater	62	28	–	–	45	84

Примечание: «–» обозначает отсутствие данных.
Note: “–” indicates the absence of data.

Таблица 4 / Table 4
Количественное содержание элементов в сточной воде в ходе эксперимента
Element contents in wastewater during the experiment

Показатели Parameters	Сточная вода Control wastewater	Сточная вода, инокулированная микроводорослями Inoculated wastewater	Сточная вода после осаждения и удаления клеток микроводорослей Processed wastewater after the harvest
Цветность, градусы Chromaticity, degrees	942	884	560
pH	8,7±0,2	8,9±0,2	8,5±0,2
Концентрация, мг/дм ³ / Concentration, mg/dm ³			
Взвешенные вещества Suspended solids	346±24	484±24	150±14
NH ₄ ⁺	0,7±0,3	0,43±0,17	0,40±0,17
NO ₃ ⁻	1,3±0,4	1,3±0,4	1,1 ±0,3
NO ₂ ⁻	0,023±0,005	0,013±0,006	< 0,001
Cl ⁻	97±13	100±13	45±10
PO ₄ ³⁻	0,13±0,03	1,31±0,24	0,09±0,02
P _{общ.} / P _{tot.}	0,39±0,12	0,61±0,15	0,11±0,04
S _{общ.} / S _{tot.}	128±23	131±24	86±20
N _{общ.} / N _{tot.}	2,1±0,4	2,0±0,4	1,45±0,3
Ca	36±6	86±14	16±3
Mg	8,1±1,2	9,3±1,4	3,2±0,8
K	26±4	30±5	11±2
Na	300±40	320±50	249±34
Fe	0,19±0,05	0,19±0,05	0,12±0,03
Концентрация, мкг/дм ³ / Concentration, µg/dm ³			
Mn	69±17	610±110	65±17
Zn	< 5,0	< 5,0	< 5,0
Cu	0,44±0,18	17±7	2,1±0,9
Pb	< 4,0	< 4,0	< 4,0
Cd	< 0,20	0,33±0,12	< 0,20
Ni		3,4±1,4	
Co	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Cr		2,1±0,5	
B	56±13	50±12	32±10
Ba	22±6	40±10	14±3
Sr	170±30	260±50	98±15
Al	1900±300	1880±280	1670±240
As	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Hg	0,014±0,008	0,029±0,017	0,018±0,009
Фенол / Phenol	69±12	29±5	11±2

2. Показано, что сточная вода АО «Монди СЛПК» может использоваться в качестве питательной среды для культивирования микроводорослей *Chlorella vulgaris* f. *globosa* при масштабировании процесса производства биомассы.

Авторы выражают благодарность экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН за проведение количественного химического анализа.

Работа выполнена при финансировании Государственного задания № 1021051101411-4-

1.6.23 «Научно-обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере».

References

1. Gordeeva Y.M. Waste management law and policy: global trends and European Union experience // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 237–241. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-237-241
2. The United Nations world water development report 2017. Wastewater: the untapped resource. Paris: UNESCO, 2017. 180 p.
3. Chowdhury S., Mazumder M.A.J., Al-Attas O., Husain T. Heavy metals in drinking water: occurrences, implications, and future needs in developing countries // Science of the Total Environment. 2016. V. 569–570. P. 476–488. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.166
4. Sousa J.C.G., Ribeiro A.R., Barbosa M.O., Pereira M.F.R. A review on environmental monitoring of water organic pollutants identified by EU guidelines // Journal of Hazardous Materials. 2018. V. 344. P. 146–162. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.09.058
5. Shlekova I.Yu., Knysh A.I. Improving the efficiency of aerobic biological treatment of oily wastewater // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 203–209. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209
6. Zhang L., Cheng J., Pei H., Pan J., Jiang L., Hou Q., Han F. Cultivation of microalgae using anaerobically digested effluent from kitchen waste as a nutrient source for biodiesel production // Renewable Energy. 2018. V. 115. P. 276–287. doi: 10.1016/j.renene.2017.08.034
7. Olsson J., Feng X.M., Ascue J., Gentili F.G., Sha-biimam M.A., Nehrenheim E., Thorin E. Co-digestion of cultivated microalgae and sewage sludge from municipal wastewater treatment // Bioresource Technology. 2014. V. 171. P. 203–210. doi: 10.1016/j.biortech.2014.08.069
8. Shchemelinina T.N., Patova E.N., Tarabukin D.V., Anchugova E.M., Ocheretenko D.P., Volodin V.V. Wastewater treatment of the timber industry complex using microalgae // Ecology and industry of Russia. 2015. V. 19. No. 7. P. 44–47 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2015-7-44-47
9. Shchemelinina T.N., Anchugova E.M., Gogonin A.V., Tarabukin D.V., Shapenkov D.M. Strain of microalgae *Chlorella vulgaris* Beijer. f. *globosa* V. Andr. for the purification of natural reservoirs and wastewater of industrial enterprises // Patent RU 2703499 C1. Application: 2018120704, 05.06.2018. Date of publication: 17.10.2019. Bull. No. 29 (in Russian).
10. Chinnasamy S., Sood A., Renuka N., Prasanna R., Ratha S.K., Bhaskar S., Rengasamy R., Lewis D.M. Ecobiological aspects of algae cultivation in wastewaters for recycling of nutrients and biofuel applications // Biofuels. 2014. V. 5. P. 141–158. doi: 10.4155/bfs.13.78
11. Renuka N., Sood A., Ratha S.K., Prasanna R., Ahluwalia A.S. Evaluation of microalgal consortia for treatment of primary treated sewage effluent and biomass production // Journal of Applied Phycology. 2013. V. 25. P. 1529–1537. doi: 10.1007/s10811-013-9982-x
12. Mandotra S.K., Kumar P., Suseela M.R., Ramteke P.W. Fresh water green microalga *Scenedesmus abundans*: a potential feedstock for high quality biodiesel production // Bioresource Technology. 2014. V. 156. P. 42–47. doi: 10.1016/j.biortech.2013.12.127
13. Yadavalli R., Rao C.S., Rao R.S., Potumarthi R. Dairy effluent treatment and lipids production by *Chlorella pyrenoidosa* and *Euglena gracilis*: study on open and closed systems // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2014. V. 9. P. 368–373. doi: 10.1002/apj.1805
14. Dutta P., Sahu E., Bhuyan P., Bastia A.K. Analysis of growth and biochemical contents of microalgae grown with wastewater effluent of Emami paper mill, Bala-sore // The Role of Microalgae in Wastewater Treatment. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2019. P. 153–168. doi: 10.1007/978-981-13-1586-2_12
15. Ivanovsky V.S., Markin I.V., Shchelkanova E.S., Volodyashkin R.A. Bionanotechnological aspects of wastewater treatment by microalgae // Industrial Ecology. 2021. No. 1 (113). P. 17–21 (in Russian). doi: 10.52190/2073-2589_2021_1_17
16. Feng Y., Li C., Zhang D. Lipid production of *Chlorella vulgaris* cultured in artificial wastewater medium // Bioresource Technology. 2011. V. 102. P. 101–105. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.016
17. Rajalakshmi A.M., Silambarasan T., Dhanda-pani R. Small scale photo bioreactor treatment of tannery wastewater, heavy metal biosorption and CO₂ sequestration using microalga *Chlorella* sp.: a biodegradation approach // Applied Water Science. 2021. V. 11. P. 1–12. doi: 10.1007/s13201-021-01438-w
18. Kothari R., Pathak V.V., Kumar V., Singh D.P. Experimental study for growth potential of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* on dairy waste water: an integrated approach for treatment and biofuel production // Bioresource Technology. 2012. V. 116. P. 466–470. doi: 10.1016/j.biortech.2012.03.121
19. Sinha S., Singh R., Chaurasia A.K., Nigam S. Self-sustainable *Chlorella pyrenoidosa* strain NCIM 2738 based photobioreactor for removal of direct Red-31 dye along with other industrial pollutants to improve the water-quality // Journal of Hazardous Materials. 2015. V. 306. P. 386–394. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.12.011
20. Eio E.J., Kawai M., Niwa C., Ito M., Yamamoto S., Toda T. Biodegradation of bisphenol A by an algalbacterial system // Environmental Science and Pollution Research. 2015. V. 22. P. 15145–15153. doi: 10.1007/s11356-015-4693-2
21. Kulnev V.V., Pochechun V.A. Experience of algolization of drinking reservoirs of the Nizhny Tagil industrial hub // Interdisciplinary scientific and applied

journal "Biosphere". 2016. V. 8. No. 3. P. 287–290 (in Russian).

22. Pinaev V.E., Kasimov D.V. Reclamation – water bodies and land // Online journal SCIENCE Studies. 2017. V. 9. No. 2. P. 1–9 (in Russian).

23. Gaysina L.A., Fazlutdinova A.I., Kabirov R.R. Modern methods of isolation and cultivation of algae. Ufa: Publishing House of BSPU, 2008. 151 p. (in Russian).

24. Mikhajljuk A.V., Shchemelinina T.N., Anchugova E.M. Liuk's nutrient medium for cultivation of microalgae // Patent RU 2556126 C1. Application RU2014100232/10A, 09.01.2014. Date of publication: 10.07.2015. Bull. No. 19 (in Russian).

25. Ministerial Decree No. 552 of 13 December 2016 regarding elaboration and validation of water quality standards for fishery waterbodies, including maximum concentration limits of pollutants in the water [Internet resource] <https://leap.unep.org/countries/ru/national-legislation/>

ministerial-decree-no-552-13-december-2016-regarding-elaboration (Accessed: 12.15.2021).

26. Jena J., Subudhi E. Microalgae: An untapped resource for natural antimicrobials // The Role of Microalgae in Wastewater Treatment. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2019. P. 99–114. doi: 10.1007/978-981-13-1586-2_8

27. Sukla L.B., Subudhi E., Pradhan D. The role of microalgae in wastewater treatment. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2019. 274 p. doi: 10.1007/978-981-13-1586-2

28. Abdulagatov I.M., Alkhasov A.B., Dogeev G.D., Tumalaev N.R., Aliev R.M., Badavov G.B., Aliev A.M., Salikhova A.S. Microalgae and their technological applications in energy and environmental protection // South of Russia: Ecology, Development. 2018. V. 13. No. 1. P. 166–183 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2018-1-166-183