

Потенциал применения микроводорослей

А. В. Гогонин, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова

Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
г. Сыктывкар
gogonin@ib.komisc.ru
tatyanakomi@mail.ru
anchugova@ib.komisc.ru

Аннотация

Исследована возможность устойчивого производства биомассы консорциума микроводорослей (*Vischeria magna*, *Coelastrum proboscideum*) с высоким содержанием аминокислот на сточной воде лесопромышленного комплекса ОАО «Сыктывкарский ЛПК» с одновременной очисткой сточной воды от основных загрязняющих веществ. Внешение консорциума микроводорослей приводит к снижению содержания кадмия, бария, алюминия, аммонийного и нитритного азота по сравнению с контрольным вариантом. Концентрация накопленных микроводорослями аминокислот в стерильной сточной воде составила 84,98 %, в нестерильной – 46,39 %.

Ключевые слова:

аминокислоты, микроводоросли, стерильная и нестерильная сточная вода, культивирование

Введение

В настоящее время применение микроводорослей (далее – МВ) в различных отраслях биотехнологии и промышленности становится наиболее перспективным в связи с их интенсивным ростом и рентабельностью культивирования некоторых штаммов. Например, *Tetrademus obliquus*, *Chlorella vulgaris*, *Dictyococcus varians* и *Pseudococcomyxa simplex* используются для решения задач во многих отраслях промышленности: энергетика (производство биодизеля), сельское хозяйство, фармацевтика, производство пищевых продуктов и др. [1–3]. В экологической биотехнологии чаще всего культуры микроводорослей применяют для очистки сточных вод [4, 5] или в составе консорциума для рекультивации нефтезагрязненной почвы [6].

Сточная вода, как и природная, является нестабильной и сложной системой, в составе которой содержатся минеральные и органические вещества, биогенные элементы, различные газы [7]. Концентрация перечисленных веществ в некоторых случаях превышает предельно допустимые концентрации (далее – ПДК) в естественных условиях [8]. Сточные воды (далее – СВ) лесопромышленного предприятия цеха биологической очистки сточных вод (ЦБОСВ) ОАО «Сыктывкарский ЛПК», включающие как про-

Potential applications of microalgae

A. V. Gogonin, T. N. Shchemelinina, E.M. Anchugova

Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the
Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar
gogonin@ib.komisc.ru
tatyanakomi@mail.ru
anchugova@ib.komisc.ru

Abstract

The paper reviews the possibility for the sustainable production of amino acid-rich microalgal consortium biomass (*Vischeria magna*, *Coelastrum proboscideum*) in wastewater generated by the Syktyvkar timber-processing complex with the simultaneous purification of the wastewater from the main pollutants. The introduction of the microalgal consortium results in a reduction in the concentration of cadmium, barium, aluminium, ammonium, and nitrite nitrogen in comparison to the control. The concentration of amino acids accumulated by microalgae is found to be 84.98 % in sterile wastewater and 46.39 % in non-sterile wastewater.

Keywords:

amino acids, microalgae, sterile and non-sterile wastewater, cultivation

мышленные (210 тыс. м³/сут), так и коммунально-бытовые (81 тыс. м³/сут) стоки, весьма неоднородны по химическому составу и разнообразны по времени [9]. Сброс недостаточно очищенной сточной воды приводит к загрязнению водных ресурсов и угнетению экосистемы водоема.

Доочистка сточных вод с применением микроводорослей снижает содержание загрязнителей в сбрасываемой воде в открытые гидрологические системы [10]. Кроме того, при очистке сточной воды от загрязнителей происходит стремительный рост биомассы микроводорослей с образованием ценных вторичных метаболитов – аминокислот. Свободные аминокислоты участвуют в построении молекул белка, синтезе метаболитов, осуществляют транспорт азота и его ассимиляцию, выполняют антиоксидантную функцию, снижают токсичность ионов тяжелых металлов на организмы [11].

Культивирование МВ на сточной воде лесопромышленного комплекса могло бы быть решением многих задач: доочистка сточной воды от основных загрязнителей, накопление биомассы МВ с образованием аминокислот для использования в различных отраслях промышленности [12].

Цель работы – исследование возможности получения на сточной воде лесопромышленного комплекса ОАО «Сыктывкарский ЛПК» биомассы микроводорослей с высоким содержанием аминокислот с одновременной очисткой сточной воды от основных загрязняющих веществ.

Материалы и методы

Для проведения исследования по одновременной очистке сточной воды и накоплению аминокислот микроводорослями были подобраны следующие штаммы:

– *Vischeria magna* (J. B. Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl – водоросль из отдела Ohrophyta (*Eustigmatos magnus* (J. B. Petersen) D. J. Hibberd (SYKOA E-001-09)). Клетки одиночные, коккоидные, от 14 до 34 мкм в диаметре. Вид встречается в водной и почвенной средах [13]. Водоросль легко культивируется, толерантна к воздействию тяжелых металлов и устойчива к высоким температурам. Верхний предел устойчивости зафиксирован при температуре воды около +66 °C [14].

– *Coelastrum proboscideum* Bohlin – зеленая микроводоросль из отдела Chlorophyta (IPPAS C-2055). Образует ценобии из 4–64 клеток, но встречаются одно- и двуклеточные формы. Клетки от 5 до 30 мкм в диаметре [15]. Вид широко распространен в пресных водоемах с различным уровнем загрязнения поллютантами [16].

Характеристика СВ приведена в табл. 2.

Накопление маточных культур МВ (*V. magna*, *C. proboscideum*) проводили в 250 см³ колбах на питательной среде Тамия в течение 14 сут, отдельно. Далее культуры объединяли. Титр клеток консорциума составлял $4,5 \times 10^8$ кл/см³.

Для эксперимента в емкости на 3 дм³ помещали сточную воду (по схеме: стерильную (далее – ССВ) и нестерильную (далее – НСВ) СВ по 1,5 дм³ и инокулировали консорциумом МВ в количестве 1 % от общего объема. Стерильную воду получали путем автоклавирования в стерилизаторе паровом Tuttnauer 2540 ML. Режим – освещение фитолампой OSRAM L 18W/77 Fluora, световой поток 550 lumen, аэрация компрессором Tetrates APS 400, температура – комнатная (+22–23 °C). Контролем служила СВ, отобранная из вторичных отстойников без внесения инокулята (табл. 1). Продолжительность эксперимента – 24 ч., в трех повторностях.

Химический анализ образцов проводили: рН – потенциометрическим методом [17]; содержание аммиака, аммоний-иона – фотометрическим методом [18], массовую концентрацию элементов – атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой [19], содержание аминокислот – методом жидкостной хроматографии на ионообменных смолах [20].

Результаты и их обсуждение

В системе ЦБОСВ ОАО «Сыктывкарский ЛПК» на последней стадии очистки (вторичных отстойниках) в качестве доочистки можно использовать микроводоросли. Однако состав воды вторичных отстойников предполагает наличие и сторонних микроорганизмов, которые могут либо негативно сказаться на процессе очистки, либо,

Таблица 1

Схема эксперимента

Table 1

Experiment scheme

Обозначение пробы	Наименование
СВ	Контроль
НСВ+МВ	Нестерильная сточная вода с отстойников + консорциум МВ
ССВ+МВ	Стерильная сточная вода с отстойников + консорциум МВ

Таблица 2

Количественное содержание элементов в сточной воде в процессе эксперимента

Table 2

Quantitative content of elements in wastewater during the experiment

Показатели	СВ±Δ	НСВ + МВ±Δ	ССВ + МВ±Δ
рН	8,77±0,2	8,96±0,2	8,78±0,2
Концентрация, мг/дм ³			
NH ₄ ⁺	1,8±0,4	0,62±0,25	0,49±0,4
NO ₂ ⁻	0,044±0,01	0,015±0,006	0,014±0,006
Концентрация, мкг/дм ³			
Cd	0,70±0,25	0,51±0,18	0,35±0,12
Ba	105±21	24±6	30±8
Al	165±40	23±7	22±7

Условное обозначение. ±Δ – границы интервала абсолютной погрешности при $p = 0,95$.

Key. ±Δ – absolute error limits at $p = 0.95$.

напротив, в синергетических отношениях с микроводорослями образовывать ассоциации и повышать эффективность доочистки. Для модельного эксперимента был выбран ранее исследованный консорциум МВ (*V. magna*, *C. proboscideum*) [21], инокулированный в стерильную и нестерильную сточную воду (табл. 2).

Введение в стерильную и нестерильную сточную воду консорциума микроводорослей приводило к снижению содержания кадмия, бария, алюминия, аммонийного и нитритного азота по сравнению с контрольным вариантом (табл. 2).

Азот является важнейшим и лимитирующим элементом в питании фотосинтезирующих микроорганизмов для быстрого роста и накопления первичных и вторичных метаболитов. По распространенности в клетках микроводорослей азот занимает второе место после углерода, так как входит в состав большого количества внутриклеточных компартментов и соединений – пептидов, белков, аминокислот, ферментов [22, 23]. Одним из источников азота в сточных водах и естественных гидросистемах является аммоний. По данным литературы [24], аммоний считается предпочтительнее при культивировании микроводорослей, так как отсутствует необходимость в окислительно-восстановительной реакции. Аммоний в большинстве случаев поступает в природные и искусственные гидросистемы с хозяйственно-бытовыми стоками, отходами производства животноводческих комплексов, сельскохозяйственных предприятий. Эффективность потребления консор-

циумом MB в HCB и CCB аммоний-ионов составила 65,5 и 72,8 % и нитрит-ионов – 65,9 и 68,0 % соответственно (см. табл. 2). В конце эксперимента содержание NO₂⁻ в HCB и CCB было ниже уровня ПДК, содержание NH₄⁺ в CCB не превышало ПДК.

Биосорбция клетками микроводорослей ионов тяжелых металлов происходит в два этапа – адсорбция ионов на поверхности клеток микроводорослей с последующим проникновением и накоплением ионов тяжелых металлов в цитоплазме клетки. Накопление ионов металлов в клетках живых организмов является необходимым, вследствие метаболических реакций, роста и развития культуры клеток [25]. В СВ содержание алюминия превышало ПДК. Аккумуляция ионов Al консорциумом MB приводила к снижению его содержания до уровня ПДК (см. табл. 2).

Микроводоросли синтезируют незаменимые и заменимые аминокислоты [26], которые могут быть использованы не только в качестве пролонгированного удобрения, но и очищены и переработаны для питания животных [27]. В табл. 3 приведен сравнительный анализ аминокислотного состава микроводорослей, консорциумов MB, культивируемых на сточной воде ЦБОСВ ОАО «Сыктывкарский ЛПК» и сточной воде производства свиного мяса в Бразилии [28]. Во всех вариантах было идентифицировано 18 аминокислот, из которых 11 являются незаменимыми. В составе белка биомассы преобладали глутаминовая, аланиновая и лейциновая кислоты, ответственные за мета-

болизм азотсодержащих биохимических веществ. Состав аминокислот меняется не только в зависимости от штамма MB [29], но и типа сточной воды.

Michelon и др. [28] показали, что концентрации аминокислот, обнаруженных в биомассе *Spirulina maxima*, были сравнительно выше, чем в *Phormidium* sp. и в консорциуме (*Chlorella* sp. и *Scenedesmus* sp.) при культивировании в одних и тех же разбавленных сточных водах свиноводческого комплекса (табл. 3).

Накопление аминокислот в биомассе консорциума MB происходило при культивировании на CCB и HCB, при этом на стерильной воде содержание аминокислот было больше в 1,8 раза (табл. 3). Так как культивируемые на богатых питательными веществами сточных водах MB улавливают их избыток, биомассу можно использовать в качестве биоудобрений пролонгированного действия, из которых элементы питания поступают в почву в соответствии со скоростью усвоения их растениями на протяжении всего периода вегетации. В этом контексте микроводоросли представляют собой платформу для потенциальной разработки продуктов для улучшения качества почвы, производства и защиты сельскохозяйственных культур, таких как биоудобрения, органические удобрения, биостимуляторы, средства биоконтроля и кондиционеры почвы [30]. Так, серосодержащие аминокислоты, метионин и цистеин являются важными компонентами растворимых в почве органических S и N [31, 32]. В работе Rosa la et al. [33]

Таблица 3

Содержание аминокислот в биомассе микроводорослей, культивируемых на сточных водах, %

Table 3

Content of amino acids in biomass of microalgae cultivated in wastewater, %

Аминокислоты, %	Данные исследования			Сточная вода производства свиного мяса в Бразилии [23]		
	Контроль	ССВ+MB	НСВ+MB	<i>Chlorella</i> sp. и <i>Scenedesmus</i> sp.	<i>Spirulina maxima</i>	<i>Phormidium</i> sp.
Незаменимые аминокислоты						
Валин	0,9	5,5	0,49	1,4	4,1	2,1
Изолейцин	0,0	4,4	0,37	0,8	3,3	2,3
Треонин	0,2	1,2	0,11	1,1	4,0	2,6
Метионин	0,1	0,0	0,01	0,5	0,53	0,6
Лейцин	0,5	10,7	0,8	2,0	6,7	4,1
Фенилаланин	0,0	4,4	4,3	1,2	3,4	2,2
Лизин	0,7	7,9	6,0	1,2	4,1	1,8
Пролин	0,6	10,4	5,1	1,3	3,9	1,1
Гистидин	0,0	1,4	1,2	0,2	2,3	0,85
Аргинин	0,0	6,3	4,3	1,1	5,5	2,8
Триптофан	-	-	-	-	0,3	-
Заменимые аминокислоты						
Аспарагин	0,5	9,0	6,7	2,4	7,3	4,7
Серин	0,2	2,1	1,5	1,0	3,9	2,1
Глутамин	0,5	1,28	0,92	3,6	12,3	5,01
Глицин	0,5	7,6	5,4	1,4	4,05	4,4
Аланин	0,2	10,4	6,9	2,3	5,9	3,8
Цистеин	0,0	1,2	1,5	0,3	-	-
Тирозин	0,0	1,2	0,8	0,7	3,2	2,6
Сумма	4,4	84,98	46,39	22,5	74,78	43,06

сообщается о влиянии аминокислот метионина и аргинина на повышенную активность азотфиксирующих и фосформинерализующих бактерий в ризосфере *Agave lechuguilla*. Высокое накопление аргинина отмечено в биомассе консорциума MB на CCB (табл. 3). Концентрация метионина была нулевой в CCB+MB и низкой – в HCB+MB.

Стандартный белковый рацион, используемый в свиноводстве, требует добавления незаменимых аминокислот, таких как лизин, треонин, метионин и триптофан [34], в птицеводстве – глицин, треонин, пролин, а также играют физиологическую и регулирующие роли, помимо синтеза белка, в росте цыплят и яйценоскости значимое место занимает заменимая кислота – глютамин [35, 36]. Дефицит аминокислот может ухудшить рост животных, иммунитет, повышать восприимчивость к инфекционным заболеваниям, а также способствовать возникновению других проблем с пищеварением и репродукцией [37]. Концентрация перечисленных аминокислот, обнаруженных в биомассе микроводорослей, культивируемых как на СВ лесопромышленного пред-

приятия, так и СВ свиноводческого комплекса в пределах 0,1-12,3 % (табл. 3), превышает минимальные требования к содержанию аминокислот. Таким образом, МВ, полученные при фикоремедиации сточных вод, могут быть переработаны в качестве источника биоудобрений и пищевых добавок для животных (экономика замкнутого цикла).

Заключение

Технология получения аминокислот из водорослей, ранее использованных для очистки богатых питательными веществами сточных вод, позволит одновременно иметь доступ к получению вторичного сырья для крупномасштабного производства биоудобрений на основе микроводорослей, применяемых в агропромышленном секторе, и уменьшить воздействие промышленных стоков на окружающую среду.

Установлено, что сточная вода вторичных отстойников ЦБОСВ лесопромышленного предприятия ОАО «Сыктывкарский ЛПК» может быть использована как питательная среда для культивирования микроводорослей с целью получения биомассы с высоким содержанием аминокислот. Внесение в сточную воду микроводорослей приводит к снижению основных загрязняющих веществ, содержание которых не превышает ПДК.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. A multidisciplinary review of *Tetrademus obliquus*: a microalgae suitable for large-scale biomass production and emerging environmental applications / С. Y. B. Oliveira, C. D. L. Oliveira, R. Prasad [et al.] // *Reviews in Aquaculture*. – 2021. – Vol. 13. – P. 1594–1618. – DOI: 10.1111/raq.12536
2. Ahmad, F. The potential of *Chlorella vulgaris* for wastewater treatment and biodiesel production / F. Ahmad, A. U. Khan, A. Yaşar // *Pakistan Journal of Botany*. – 2013. – Vol. 45. – P. 461–465.
3. Бажукова, Н. В. Использование микроводорослей *Eustigmatos magnus*, *Dictyococcus varians* и *Pseudococcomyxa simplex* как объектов перспективных для биотехнологии / Н. В. Бажукова, И. В. Новаковская, Н. В. Матистов // *Биотехнология. Взгляд в будущее: тезисы II-й Международной виртуальной интернет-конференции* : Казань. – 2013. – С. 11–13. – <http://www.paxgrid.ru/conference/index.php?c=biotech2013&lang=rus>
4. Reuse of effluent water from municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production / S. Cho, T. T. Luong, D. Lee [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2011. – Vol. 102. – P. 8639–8645. – DOI: 10.1016/j.biortech.2011.03.037
5. Choi, H.-J. Parametric study of brewery wastewater effluent treatment using *Chlorella vulgaris* microalgae / H.-J. Choi // *Environmental Engineering Research*. – 2016. – Vol. 21, is. 4. – P. 401–408. – DOI: 10.4491/eer.2016.024
6. Щемелинина, Т. Н. Комплексная биотехнология очистки нефтезагрязнённой почвы / Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова // *Поволжский экологический журнал*. – 2023. – № 2. – С. 246–256. – DOI: 10.35885/1684-7318-2023-2-246-256
7. Орлова, Т. Н. Химия природных и промышленных вод : учебное пособие / Т. Н. Орлова, Д. А. Базлов, В. Ю. Орлов. – Ярославль : ЯрГУ, 2013. – 120 с.
8. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : постановление от 28 января 2021 года № 2 Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21. – 2021. – 636 с.
9. Гогонин, А. В. Консорциум микроводорослей для очистки сточных вод лесопромышленного комплекса : автореф. ... канд. биол. наук / А. В. Гогонин. – Оболонск, 2023. – 24 с.
10. Гогонин, А. В. Оценка использования сточной воды в качестве питательной среды для накопления биомассы микроводорослей / А. В. Гогонин, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2022. – № 2. – С. 68–74. – DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-109-115
11. Rai, V. K. Role of amino acids in plant responses to stresses / V. K. Rai // *Biologia Plantarum*. – 2002. – Vol. 45, iss. 4. – P. 481–487. – DOI: 10.1023/A:1022308229759
12. Composting parameters and compost quality: a literature review / K. Azim, B. Soudi, S. Boukhari [et al.] // *Organic Agriculture*. – 2018. – Vol. 8. – P. 141–158. – DOI: 10.1007/s13165-017-0180-z
13. Давыдов, Д. А. Водоросли и цианопрокариоты на участках самозарастания золошлакоотвалов ТЭЦ города Апатиты (Мурманская область) / Д. А. Давыдов, В. В. Редькина // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. – 2021. – С. 51–68. – DOI: 10.17076/bg1270
14. Сафиуллина, Л. М. Толерантность почвенных водорослей *Eustigmatos magnus* (B.Petersen) Hibberd (*Eustigmatophyta*) и *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in Cleve et Grunow (*Bacillariophyta*) к воздействию тяжелых металлов / Л. М. Сафиуллина, А. И. Фазлутдинова, Г. Р. Бакиева // *Вестник Оренбургского государственного университета*. – 2009. – С. 42–44.
15. Царенко, П. М. Краткий определитель хлорококковых водорослей Украинской ССР : учебное пособие / П. М. Царенко. – Киев : Изд-во «Наукова Думка», 1990. – 208 с.
16. Топачевский, А. В. Пресноводные водоросли Украинской ССР : учебное пособие / А. В. Топачевский, Н. П. Масюк. – Киев : Вища школа, 1984. – 336 с.
17. Методика выполнения измерений pH в водах потенциометрическим методом. ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 (ФР.1.31.2007.03794). – Сыктывкар : ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2004.
18. Методика измерений массовой концентрации аммиака и аммоний-ионов в питьевых, природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. ПНД Ф 14.1:2:4.276-2013, (ФР.1.31.2013.16660). – Сыктывкар : ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2013.

19. Методика выполнения измерений массовой концентрации элементов в пробах питьевой, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. ПНД Ф 14.1:2:4.135-98. – Сыктывкар : ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2008.
20. Методика выполнения измерений содержания аминокислот, входящих в состав белков растений, методом жидкостной хроматографии на ионообменных смолах, Методика измерений № 88-17641-97-2010 (АН/1/31/2014/17660). – Сыктывкар : ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2010.
21. Гогонин, А. В. Создание консорциума микроводорослей с оптимальным составом и титром клеток / А. В. Гогонин, И. В. Новаковская // Материалы докладов III Всероссийской (XVIII) молодежной научной конференции «Молодежь и наука на Севере» (с элементами научной школы). – Сыктывкар, 2018. – С. 80–81.
22. Markou, G. Microalgal and cyanobacterial cultivation: the supply of nutrients / G. Markou, D. Vandamme, K. Muylaert // Water Research. – 2014. – Vol. 65. – P. 186–202. – DOI: 10.1016/j.watres.2014.07.025
23. Andersen, R. A. The microalgal cell. In A. Richmond & Q. Hu (Eds.) / R. A. Andersen // Handbook of Microalgal Culture : Applied Phycology and Biotechnology. – 2013. – P. 3–20.
24. Barsanti, L. Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology / L. Barsanti, P. Gualtieri // Boca Raton : CRC Press, 2006. – 301 p. – DOI: 10.1002/9781118567166.ch1
25. Priyadarshini, E. Heavy metal resistance in algae and its application for metal nanoparticle synthesis / E. Priyadarshini, S. S. Priyadarshini, N. Pradhan // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2019. – Vol. 103. – P. 3297–3316. – DOI: 10.1007/s00253-019-09685-3
26. Microalgae: a potential alternative to health supplementation for humans / A. K. Koyande, K. W. Chew, K. Ramba-bu [et al.] // Food Science and Human Wellness. – 2019. – Vol. 8. – P. 16–24. – DOI: 10.1016/j.fshw.2019.03.001
27. FAO/WHO. Report of a Joint FAO/WHO Expert Committee. In: Food and Agriculture Organization (ed) Energy and Protein Requirements. 1973.
28. Amino acids, fatty acids, and peptides in microalgae biomass harvested from phycoremediation of swine wastewaters / W. Michelon, M. L. B. da Silva, A. Matthiensen [et al.] // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2022. – Vol. 12. – P. 869–880. – DOI: 10.1007/s13399-020-01263-2
29. Chemical composition of cyanobacteria grown in diluted, aerated swine wastewater / R. O. Canizares-Villanueva, A. R. Dominguez, M. S. Cruz, E. Rios-Leal // Bioresource Technology. – 1995. – Vol. 51. – P. 111–116.
30. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture / A. L. Alvarez, S. L. Weyers, H. M. Goemann [et al.] // Algal Research. – 2021. – Vol. 54. – 102200. – DOI: 10.1016/j.algal.2021.102200
31. Effect of elements availability on the decomposition and utilization of S-containing amino acids by microorganisms in soil and soil solutions / Q. Ma, R. Yao, X. Liu [et al.] // Plant and Soil. – 2024. – DOI: 10.1007/s11104-024-06864-8
32. Competition for two sulphur containing amino acids (cysteine and methionine) by soil microbes and maize roots in the rhizosphere / D. Wang, J. Wang, D. R. T. Ge Chadwick, D. L. Jones // Biology and Fertility of Soils. – 2023. – Vol. 59. – P. 697–704. – DOI: 10.1007/s00374-023-01724-6
33. Amino acids in the root exudates of *Agave lechuguilla* Torr. Favor the recruitment and enzymatic activity of nutrient-improvement Rhizobacteria / G. M. la Rosa, F. García-Oliva, C. Ovando-Vázquez [et al.] // Microbial Ecology. – 2023. – Vol. 86. – P. 1176–1188. – DOI: 10.1007/s00248-022-02162-x
34. Protein-restricted diet balanced for lysine, methionine, threonine, and tryptophan for nursery pigs elicits subsequent compensatory growth and has long term effects on protein metabolism and organ development / Y. Sun, T. Teng, G. Bai, [et al.] // Animal Feed Science and Technology. – 2020. – Vol. 270. – 114712. – DOI: 10.1016/j.anifeeds.2020.114712
35. Siegert, W. The relevance of glycine and serine in poultry nutrition: a review / W. Siegert, M. Rodehutschord // British Poultry Science. – 2019. – Vol. 60, N 5. – P. 579–588. – DOI: 10.1080/00071668.2019.1622081
36. He, W. Amino acid nutrition and metabolism in chickens / W. He, P. Li, G. Wu // Advances in Experimental Medicine and Biology. – 2021. – Vol. 1285. – P. 109–131. – DOI: 10.1007/978-3-030-54462-1_7
37. Yang, Z. Physiological effects of dietary amino acids on gut health and functions of swine / Z. Yang, S. F. Liao // Frontiers in Veterinary Science. – 2019. – Vol. 6. – P. 1–13. – DOI: 10.3389/fvets.2019.00169

References

1. A multidisciplinary review of *Tetrademus obliquus*: a microalgae suitable for large-scale biomass production and emerging environmental applications / C. Y. B. Oliveira, C. D. L. Oliveira, R. Prasad [et al.] // Reviews in Aquaculture. – 2021. – Vol. 13. – P. 1594–1618. – DOI: 10.1111/raq.12536
2. Ahmad, F. The potential of *Chlorella vulgaris* for wastewater treatment and biodiesel production / F. Ahmad, A. U. Khan, A. Yaşar // Pakistan Journal of Botany. – 2013. – Vol. 45. – P. 461–465.
3. Bazhukova, N. V. Ispol'zovanie mikrovodoroslej *Eustigmatos magnus*, *Dictyococcus varians* i *Pseudococcomyxa simplex* kak ob'ektov perspektivnyh dlya biotekhnologii [Utilization of microalgae *Eustigmatos magnus*, *Dictyococcus varians* and *Pseudococcomyxa simplex* as objects promising for biotechnology / N. V. Bazhukova, I. V. Novakovskaya, N. V. Matistov // Biotekhnologiya. Vzgl'yad v budushchee: Tez. II-j Mezhdunar. virtual'noj internet konf. [Biotechnology. A View to the Future: Theses of the II Int. Virtual Internet Conf.] – Kazan, 2013. – P. 11–13. – <http://www.paxgrid.ru/conference/index.php?c=biotech2013&lang=rus>

4. Reuse of effluent water from municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production / S. Cho, T. T. Luong, D. Lee [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2011. – Vol. 102. – P. 8639–8645. – DOI: 10.1016/j.biortech.2011.03.037
5. Choi, H.-J. Parametric study of brewery wastewater effluent treatment using *Chlorella vulgaris* microalgae / H.-J. Choi // *Environmental Engineering Research*. – 2016. – Vol. 21, iss. 4. – P. 401–408. – DOI: 10.4491/eer.2016.024
6. Shchemelinina, T. N. Kompleksnaya biotekhnologiya ochistki neftezagryaznyonnoj pochvy [Integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup] / T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova // *Povolzhskij ekologicheskij zhurnal [Povolzhskiy Journal of Ecology]*. – 2023. – N 2. – P. 246–256. – DOI: 10.35885/1684-7318-2023-2-246-256
7. Orlova, T. N. Himiya prirodnyh i promyshlennyh vod : uchebnoe posobie [Chemistry of natural and industrial waters : textbook] / T. N. Orlova, D. A. Bazlov, V. Yu. Orlov. – Yaroslavl : Yaroslavskiy State University, 2013. – 120 p.
8. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya : postanovlenie ot 28 yanvarya 2021 goda № 2 Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 [Hygienic norms and requirements to ensure safety and (or) harmlessness to humans of habitat factors: [Resolution dated 28 January 2021 No. 2 On Approval of Sanitary Rules and Norms SanPiN 1.2.3685-21]. – 2021. – 636 p.
9. Gogonin, A. V. Konsorcium mikrovdoroslej dlya ochistki stochnyh vod lesopromyshlennogo kompleksa [Microalgae consortium for the treatment of wastewater from the forestry sector]: abstract of diss ... cand. sci. (Biology) / Gogonin A. V. – Obolensk, 2023. – 24 p.
10. Gogonin, A. V. Ocenka ispol'zovaniya stochnoj vody v kachestve pitatel'noj srede dlya nakopleniya biomassy mikrovdoroslej [Utilization of wastewaters as a nutrient medium for the accumulation of microalgal biomass] / A. V. Gogonin, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]*. – 2022. – N 2. – P. 68–74. – DOI: 10.25750/1995-4301-2022-2-109-115
11. Rai, V. K. Role of amino acids in plant responses to stresses / V. K. Rai // *Biologia Plantarum*. – 2002. – Vol. 45, iss. 4. – P. 481–487. – DOI: 10.1023/A:1022308229759
12. Composting parameters and compost quality: a literature review / K. Azim, B. Soudi, S. Boukhari [et al.] // *Organic Agriculture*. – 2018. – Vol. 8. – P. 141–158. – DOI: 10.1007/s13165-017-0180-z
13. Davydov, D. A. Vodorosli i cianoprokarioty na uchastkah samozarastaniya zoloshlakootvalov TEC goroda Apatity (Murmanskaya oblast') [Algae and cyanoprokaryotes on naturally overgrowing ash dumps of the Apatity thermal power station (Murmansk region)] / D. A. Davydov, V. V. Redkina // *Trudy Karelskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*. – 2021. – P. 51–68. – DOI: 10.17076/bg1270
14. Safiullina, L. M. Tolerantnost' pochvennyh vodoroslej *Eustigmatos magnus* (B.Petersen) Hibberd (*Eustigmatophyta*) i *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in Cleve et Grunow (*Bacillariophyta*) k vozdejstviyu tyazhelyh metallov [Tolerance of the soil algae *Eustigmatos magnus* (B.Petersen) Hibberd (*Eustigmatophyta*) and *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow in Cleve et Grunow (*Bacillariophyta*) to heavy metal exposure] / L. M. Safiullina, A. I. Fazlutdinova, G. R. Bakieva // *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University]*. – 2009. – P. 42–44.
15. Tsarenko, P. M. Kratkij opredelitel' hlorokokkovykh vodoroslej Ukrainskoj SSR : uchebnoe posobie [Brief identifier of chlorococcal algae of the Ukrainian SSR : textbook] / P. M. Tsarenko. – Kiev : Naukova Dumka, 1990. – 208 p.
16. Topachevskiy, A. V. Presnovodnye vodorosli Ukrainskoj SSR : uchebnoe posobie [Freshwater algae of the Ukrainian SSR : textbook] / A. V. Topachevskiy, N. P. Masyuk // Kiev : Vishcha shkola, 1984. – 336 p.
17. Metodika vypolneniya izmerenij pH v vodah potenciometricheskim metodom. PND F 14.1.2.3:4.121-97 (FR.1.31.2007.03794) [Methodology for performing measurements of pH in waters by potentiometric method. PND F 14.1.2.3:4.121-97 (FR.1.31.2007.03794)]. – Syktyvkar : Institute of biology of Komi science center of Ural Department of RAS, 2004.
18. Metodika vypolneniya izmerenij pH v vodah potenciometricheskim metodom. PND F 14.1.2.3:4.121-97 (FR.1.31.2007.03794) [Procedure for measuring the mass concentration of ammonia and ammonium ions in drinking, natural and waste waters by photometric method with Nessler's reagent. PND F 14.1.2:4.276-2013, (FR.1.31.2013.16660)] – Syktyvkar : Institute of biology of Komi science center of Ural Department of RAS. – 2013.
19. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj koncentracii elementov v probah pit'evoj, prirodnyh, stochnyh vod i atmosferynyh osadkov metodom atomno-emissionnoj spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. PND F 14.1:2:4.135-98 [Methodology for measuring the mass concentration of elements in samples of drinking, natural, waste water and atmospheric precipitation by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. PND F 14.1:2:4.135-98]. – Syktyvkar : Institute of biology of Komi science center of Ural department of RAS, 2008.
20. Metodika vypolneniya izmerenij massovoj koncentracii elementov v probah pit'evoj, prirodnyh, stochnyh vod i atmosferynyh osadkov metodom atomno-emissionnoj spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. PND F 14.1:2:4.135-98 [Methodology for performing measurements of the amino acid content of plant proteins by liquid chromatography on ion-exchange resins, Measurement Procedure No. 88-17641-97-2010 (AH/1/31/2014/17660)]. – Syktyvkar : Institute of biology of Komi science center of Ural department of RAS, 2010.
21. Gogonin, A. V. Sozdanie konsorciuma mikrovdoroslej s optimal'nym sostavom i titrom kletok [Creating a consortium of microalgae with optimal composition and cell titre] / A. V. Gogonin, I. V. Novakovskaya // *Materialy*

- dokladov III Vserossijskoj (XVIII) molodezhnoj nauchnoj konferencii «Molodezh' i nauka na Severe» (s elementami nauchnoj shkoly). – [Proceedings of the III All-Russian (XVIII) Youth Scientific Conference «Youth and Science in the North» (with elements of the scientific school)]. – Syktyvkar, 2018. – P. 80–81.
22. Markou, G. Microalgal and cyanobacterial cultivation: the supply of nutrients / G. Markou, D. Vandamme, K. Muylaert // *Water Research*. – 2014. – Vol. 65. – P. 186–202. – DOI: 10.1016/j.watres.2014.07.025
 23. Andersen, R. A. The microalgal cell. In A. Richmond & Q. Hu (Eds.) / R. A. Andersen // *Handbook of Microalgal Culture : Applied Phycology and Biotechnology*. – 2013. – P. 3–20.
 24. Barsanti, L. Algae: anatomy, biochemistry, and biotechnology / L. Barsanti, P. Gualtieri // Boca Raton : CRC Press, 2006. – 301 p. – DOI: 10.1002/9781118567166.ch1
 25. Priyadarshini, E. Heavy metal resistance in algae and its application for metal nanoparticle synthesis / E. Priyadarshini, S. S. Priyadarshini, N. Pradhan // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2019. – Vol. 103. – P. 3297–3316. – DOI: 10.1007/s00253-019-09685-3
 26. Microalgae: a potential alternative to health supplementation for humans / A. K. Koyande, K. W. Chew, K. Rambabu [et al.] // *Food Science and Human Wellness*. – 2019. – Vol. 8. – P. 16–24. – DOI: 10.1016/j.fshw.2019.03.001
 27. FAO/WHO. Report of a Joint FAO/WHO Expert Committee. In: Food and Agriculture Organization (ed) *Energy and Protein Requirements*. 1973.
 28. Amino acids, fatty acids, and peptides in microalgae biomass harvested from phycoremediation of swine wastewaters / W. Michelon, M. L. B. da Silva, A. Matthiensen [et al.] // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2022. – Vol. 12. – P. 869–880. – DOI: 10.1007/s13399-020-01263-2
 29. Chemical composition of cyanobacteria grown in diluted, aerated swine wastewater / R. O. Canizares-Villanueva, A. R. Dominguez, M. S. Cruz, E. Rios-Leal // *Bioresource Technology*. – 1995. – Vol. 51. – P. 111–116.
 30. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture / A. L. Alvarez, S. L. Weyers, H. M. Goemann [et al.] // *Algal Research*. – 2021. – Vol. 54. – 102200. – DOI: 10.1016/j.algal.2021.102200
 31. Effect of elements availability on the decomposition and utilization of S-containing amino acids by microorganisms in soil and soil solutions / Q. Ma, R. Yao, X. Liu [et al.] // *Plant and Soil*. – 2024. – DOI: 10.1007/s11104-024-06864-8
 32. Competition for two sulphur containing amino acids (cysteine and methionine) by soil microbes and maize roots in the rhizosphere / D. Wang, J. Wang, D. R. T. Ge Chadwick, D. L. Jones // *Biology and Fertility of Soils*. – 2023. – Vol. 59. – P. 697–704. – DOI: 10.1007/s00374-023-01724-6
 33. Amino acids in the root exudates of *Agave lechuguilla* Torr. favor the recruitment and enzymatic activity of nutrient-improvement rhizobacteria / G. M. la Rosa, F. García-Oliva, C. Ovando-Vázquez [et al.] // *Microbial Ecology*. – 2023. – Vol. 86. – P. 1176–1188. – DOI: 10.1007/s00248-022-02162-x
 34. Protein-restricted diet balanced for lysine, methionine, threonine, and tryptophan for nursery pigs elicits subsequent compensatory growth and has long term effects on protein metabolism and organ development / Y. Sun, T. Teng, G. Bai, Sh [et al.] // *Animal Feed Science and Technology*. – 2020. – Vol. 270. – 114712. – DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2020.114712
 35. Siegert, W. The relevance of glycine and serine in poultry nutrition: a review / W. Siegert, M. Rodehutschord // *British Poultry Science*. – 2019. – Vol. 60, N 5. – P. 579–588. – DOI: 10.1080/00071668.2019.1622081
 36. He, W. Amino acid nutrition and metabolism in chickens / W. He, P. Li, G. Wu // *Advances in Experimental Medicine and Biology*. – 2021. – Vol. 1285. – P. 109–131. – DOI: 10.1007/978-3-030-54462-1_7
 37. Yang, Z. Physiological effects of dietary amino acids on gut health and functions of swine / Z. Yang, S. F. Liao // *Frontiers in Veterinary Science*. – 2019. – Vol. 6. – P. 1–13. – DOI: 10.3389/fvets.2019.00169

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена при финансировании государственного задания № 1021051101411-4-1.6.23 «Научно-обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере».

Авторы выражают благодарность сотрудникам экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, сотрудникам отдела флоры и растительности Севера Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН к.б.н. Е. Н. Патовой, к.б.н. И. В. Новаковской.

Acknowledgements (state task):

The work was fulfilled in frames of the State Task № 1021051101411-4-1.6.23 “Science-based biotechnologies to improve the environmental situation and human health in the North”.

The authors express their gratitude to the staff of the Ecoanalytical Laboratory at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, the members of the Department of Flora and Vegetation of the North at the Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Candidate of Sciences (Biology) E. N. Patova, Candidate of Sciences (Biology) I. V. Novakovskaya.

Информация об авторах:

Гогонин Александр Владимирович – кандидат биологических наук, ведущий инженер лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; <https://orcid.org/0000-0003-1401-7412> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: gogonin@ib.komisc.ru).

Щемелинина Татьяна Николаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 56711948200, <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: tatyanakomi@mail.ru).

Анчугова Елена Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID – 56711975900, <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28; e-mail: anchugova@ib.komisc.ru).

About the authors:

Alexander V. Gogonin – Candidate of Sciences (Biology), Leading Engineer at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, <https://orcid.org/0000-0003-1401-7412> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: gogonin@ib.komisc.ru).

Tatiana N. Shchemelinina – Candidate of Sciences (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Scopus Author ID 56711948200, <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: tatyanakomi@mail.ru).

Elena M. Anchugova – Junior Researcher at the Laboratory of Biochemistry and Biotechnology, Scopus Author ID 56711975900, <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518> (Institute of Biology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 28 Kommunisticheskaya st., 167982 Syktyvkar, Komi Republic, Russia; e-mail: anchugova@ib.komisc.ru).

Для цитирования:

Гогонин, А. В. Потенциал применения микроводорослей / А. В. Гогонин, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экспериментальная биология и экология». – 2024. – № 9 (75). – С. 67–74.

For citation:

Gogonin, A. V. Potencial primeneniya mikrovodoroslej [Potential application of microalgae] / A. V. Gogonin, T. N. Shchemelinina, E. M. Anchugova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Biological Sciences". – 2024. – № 9 (75). – P. 67–74.

Дата поступления статьи: 10.09.2024

Прошла рецензирование: 23.09.2024

Принято решение о публикации: 07.10.2024

Received: 10.09.2024

Reviewed: 23.09.2024

Accepted: 07.10.2024