

Закономерности культивирования микроскопических водорослей при биофиксации углекислого газа

© 2025. А. С. Соловьёва, аспирант, Е. С. Белик, к. т. н., доцент, Л. В. Рудакова, д. т. н., профессор, зав. кафедрой, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр-кт, д. 29, e-mail: alyona.solvyova@mail.ru

Политика декарбонизации, реализуемая на предприятиях Российской Федерации, требует разработки и научного обоснования соответствующих технологических решений. Одним из перспективных подходов к утилизации выбросов углекислого газа является его фиксация микроводорослями. Этот подход основан на способности некоторых штаммов микроводорослей активно увеличивать биомассу и эффективно поглощать CO₂ при повышении концентрации углекислого газа в воздухе. В статье представлены результаты экспериментальных исследований по культивированию четырёх консорциумов микроскопических водорослей, выращенных в лаборатории и выделенных из природной среды, в газовой среде с повышенным содержанием углекислого газа. Культивирование микроводорослей осуществляли при непрерывном нагнетании CO₂, постепенно увеличивая концентрацию с 5 до 15%. Наилучшие результаты по увеличению оптической плотности показала культура, выделенная из лишайников, состоящая из цианобактерий и колоний зелёных микроводорослей рода *Chlorella*, ассоциированных с гифами грибов, и культура, выделенная из природного пресного водоёма, представляющая собой зелёные микроводоросли различных родов с преобладанием *Chlorella* spp. Наибольшие средние скорости роста данных культур наблюдались при концентрации CO₂ 10% (0,0157±0,0007 ед. опт. плотн./сут) и 5% (0,01230±0,00015 ед. опт. плотн./сут). После 102 дней культивирования биомасса микроводорослей во всех культурах увеличилась в 2–9 раз. Результаты эксперимента подтвердили эффективность использования микроводорослей для утилизации углекислого газа.

Ключевые слова: утилизация углекислого газа, биофиксация, микроводоросли, *Chlorella*.

Cultivation patterns of microscopic algae under carbon dioxide biofixation conditions

© 2025. A. S. Solovyova ORCID: 0000-0002-6017-1579,
E. S. Belik ORCID: 0000-0002-1961-0234,
L. V. Rudakova ORCID: 0000-0003-3292-8359,
Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy prospect, Perm, Russia, 614990,
e-mail: alyona.solvyova@mail.ru

The decarbonization strategy implemented in enterprises of the Russian Federation necessitates the development and scientific validation of appropriate technological solutions. One promising approach to utilising carbon dioxide emissions is the microalgae cultivation. This approach is based on the ability of some microalgae species to actively increase their biomass and sequester carbon dioxide when the the above gas content in the air increases. The article presents the results of experimental studies on cultivation of four consortia of microscopic algae in a gas medium with increased carbon dioxide content. These consortia were grown in the laboratory and isolated from the environment. Microalgae were cultivated under continuous CO₂ infusion, gradually increasing the concentration from 5 to 15%. The experiment yielded CO₂ concentrations that favoured rapid biomass growth for each of the four cultures tested. The highest average growth rates were observed: at a CO₂ concentration of 5% in a culture isolated from a eutrophic freshwater pond containing the green microalgae of various genera, including *Chlorella* spp. (0.01230±0.00015 units of optical density per day), and at a CO₂ concentration of 10% in a culture isolated from conifer lichens consisting of the microalga *Chlorella* spp. and filamentous fungi (0.0157±0.00007 units of optical density per day). The number of cells in the culture of microalgae isolated from a eutrophic freshwater pond grew particularly fast in the presence of 5% carbon dioxide. After 66 days, the optical density of the culture had increased by more than 9 times. In the remaining cultures, after 102 days, in an atmosphere with carbon dioxide content ranging from 5% to 15%, the optical density increased 2 to 3 times. The experimental results confirmed the effectiveness of microalgae for carbon dioxide utilisation.

Keywords: carbon dioxide utilisation, biofixation, microalgae, *Chlorella*.

Изменение климата – это глобальная проблема современного общества, основной причиной возникновения которой являются чрезмерные выбросы парниковых газов в атмосферу Земли. В мировой практике снижение антропогенного вклада в изменение климата достигается в основном за счёт регулирования выбросов углекислого газа и перехода к углеродно-нейтральной экономике.

В Российской Федерации климатическая политика ориентирована преимущественно на преобразование деятельности предприятий. Целевые показатели снижения выбросов парниковых газов для экономики страны и отдельных отраслей промышленности, таких как энергетика, определяются в рамках Стратегии низкоуглеродного развития РФ. С начала 2023 г. компании, выбрасывающие более 150 тыс. т CO₂-эквивалента в год, должны предоставлять отчётность по парниковым газам, а с 2025 г. данное требование распространилось на предприятия с выбросами более 50 тыс. т CO₂-эквивалента в год [1].

Внедрение митигационных мероприятий на предприятиях РФ позволит избежать экономических, социальных и экологических рисков для страны и индустриальных компаний. Научное обоснование технологических решений по снижению выбросов парниковых газов – важная задача для каждого предприятия. Исследования в данном направлении актуальны и позволят решить проблемы фундаментального и прикладного характера.

Согласно складывающимся тенденциям, одним из перспективных и устойчивых подходов к улавливанию CO₂ из выбросов является его фиксация биотехнологическим способом с использованием микроводорослей. Данный подход позволяет преобразовать освоенный антропогенной деятельностью углерод в биомассу и обеспечить его краткосрочное или среднесрочное депонирование [2, 3].

Биомасса микроводорослей содержит ценные макро- и микроэлементы, что открывает возможности её использования при производстве биотоплива, а также в сельском хозяйстве, пищевой и фармацевтической отраслях. Существующие технологии культивирования и переработки биомассы микроводорослей в большей степени являются доступными и экономически рентабельными [3–5].

Содержание углекислого газа в выбросах углеродоёмких производств обычно составляет от 3 до 15%, что значительно превышает привычную для микроводорослей

концентрацию CO₂ в атмосфере Земли – 0,03%. Известно, что для некоторых штаммов микроводорослей использование газовых смесей с повышенным содержанием углекислого газа позволяет увеличить скорость роста биомассы. При этом экстремально высокие концентрации CO₂ могут подавлять рост микроводорослей и снижать биофиксацию CO₂ [6, 7]. Таким образом, для эффективной декарбонизации промышленных выбросов необходимы поиск и адаптация культур микроводорослей, способных обеспечить устойчивый рост и высокую продуктивность в условиях культивирования с повышенным содержанием углекислого газа.

Анализ научных исследований показывает широкий диапазон реакций штаммов микроводорослей на повышенные концентрации CO₂. Микроводоросли рода *Chlorella* часто фигурируют как штаммы с высокой продуктивностью при культивировании в условиях с CO₂ в концентрации от 3 до 20%. При этом эффективность поглощения CO₂ варьирует в диапазоне 50–80% [3, 8, 9]. Кроме того, в качестве перспективных объектов исследований рассматривают смешанные культуры микроводорослей, выделенные из природной среды. Это связано с тем, что консорциумы проще переносят период адаптации, более устойчивы к загрязнению патогенными микроорганизмами и изменениям условий культивирования [10–12]. Согласно результатам исследования продуктивности 81 штамма микроводорослей в условиях повышенного содержания CO₂ (от 5 до 25%), в том числе 12 консорциумов наземных и пресноводных микроводорослей, выделенных из природной среды, установлено, что природные штаммы зелёных микроводорослей демонстрируют усиленный рост при уровне CO₂ до 25%, а также повышенную продуктивность в отношении каротиноидов и жирных кислот [7].

Цель исследования заключается в установлении закономерностей процесса культивирования микроскопических водорослей при биофиксации углекислого газа, а также в определении концентраций углекислого газа, стимулирующих рост и развитие микроскопических водорослей в различных культурах.

Объекты и методы исследования

Микроводоросли и питательная среда. В эксперименте использовали 4 культуры

микроскопических водорослей, которые были выращены в лаборатории и выделены из природной среды.

Консорциумы отбирались в окрестностях г. Перми из экосистем, содержащих микроводоросли в больших количествах – лишайников на стволах хвойных деревьев и эвтрофированного природного водоёма.

Первая культура была выделена из лишайников, в консорциуме присутствовали цианобактерии и зелёные микроводоросли рода *Chlorella*, ассоциированные с гифами грибов (мицелием) (рис. 1). Вторая культура была выращена в лабораторных условиях путём продолжительной адаптации микроскопических водорослей к питательной среде Тамия [13], в колонии преобладали зелёные микроводоросли рода *Chlorella*

мелкого размера (рис. 2). Третья культура была выделена из природного пресного водоёма и представляла собой в большей степени зелёные микроводоросли различных родов с преобладанием *Chlorella* sp. (рис. 3). В качестве четвёртой культуры на основании результатов предыдущих исследований был выбран штамм микроводоросли *p. Chlorella*, выращенный из готового биопрепарата (биологически активная добавка на основе микроводорослей *Chlorella* sp. компании «SPIRULINAFOOD») (рис. 4).

Для выращивания культур микроводорослей использовали жидкую среду Тамия, приготовленную на дистиллированной воде, следующего состава (г/л): KNO_3 – 5,0, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2,5, KH_2PO_4 – 1,25, ЭДТА – 0,037, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,009, H_3BO_3 – 0,00286,

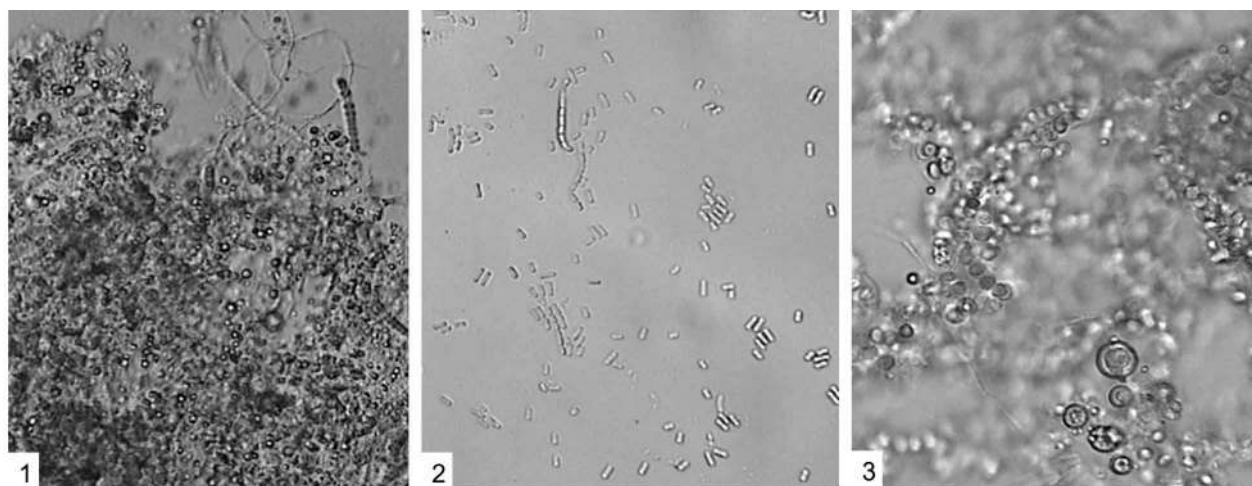


Рис. 1. Микрофотографии культуры № 1: 1 – общий вид ($\times 400$), 2, 3 – цианобактерии ($\times 800$) / Fig. 1. Culture No. 1 micrographs: 1 – general view ($\times 400$), 2, 3 – cyanobacteria ($\times 800$)

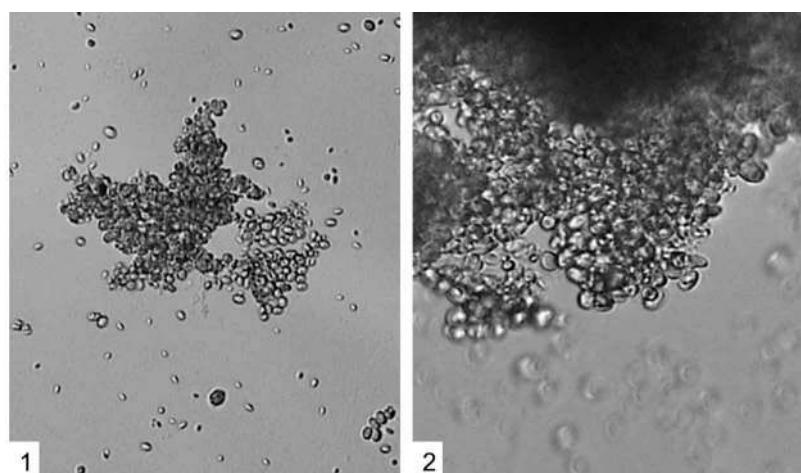


Рис. 2. Микрофотографии культуры № 2: 1 – общий вид ($\times 400$), 2 – скопление клеток микроводоросли *Chlorella* sp. ($\times 800$) / Fig. 2. Culture No. 2 micrographs: 1 – general view ($\times 400$), 2 – microalgae *Chlorella* sp. cells aggregation ($\times 800$)

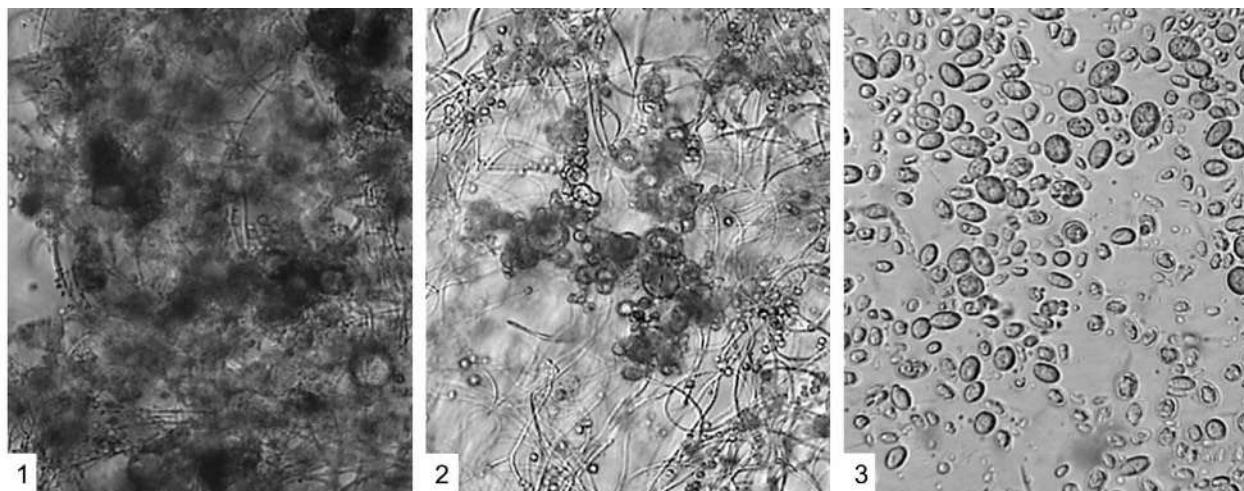


Рис. 3. Микрофотографии культуры № 3: 1 – общий вид ($\times 400$), 2, 3 – зелёные микроводоросли различных видов ($\times 800$) / **Fig. 3.** Culture No. 3 micrographs: 1 – general view ($\times 400$), 2, 3 – green microalgae of different species ($\times 800$)

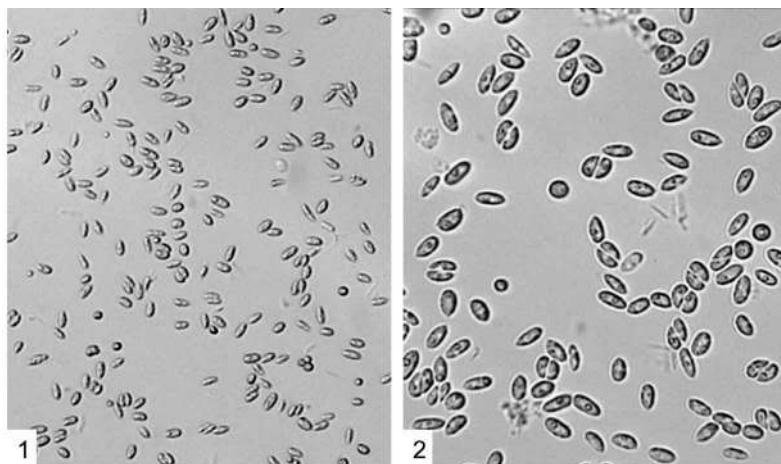


Рис. 4. Микрофотографии культуры № 4: 1 – общий вид ($\times 400$), 2 – микроводоросль *Chlorella* sp. ($\times 800$) / **Fig. 4.** Culture No. 4 micrographs: 1 – general view ($\times 400$), 2 – microalgae *Chlorella* sp. ($\times 800$)

$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 0,00181, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,000222, MoO_3 – 0,000018, NH_4VO_3 – 0,000023 [13].

Условия проведения эксперимента. Схема проведения эксперимента включала опытные и контрольные образцы для каждой из четырёх исследуемых культур. Опытные варианты культивировали в условиях повышенных концентраций углекислого газа в инкубаторе BC-J80 (Shanghai Boxun Medical Biological Instrument Corp., Китай). Контрольные варианты культивировали в условиях атмосферного воздуха (концентрация CO_2 0,03%) в климатостате КС-200 СПУ (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия) при аналогичных параметрах (температура 35 °C, режим освещения 12 часов света – 12 часов темноты).

Для освещения микроводорослей в климатостате КС-200 СПУ использовали две лампы, создающие освещённость около 500 лк. В ин-

кубатор углекислого газа BC-J80 установили светодиодную горизонтальную лампу мощностью 3 Вт со световым потоком 220 лм.

Инкубатор углекислого газа BC-J80 обеспечивал непрерывное нагнетание CO_2 . Для проведения эксперимента были выбраны концентрации углекислого газа 5, 10 и 15%. Увеличение концентрации CO_2 осуществляли поэтапно, без прерывания процесса культивирования.

В эксперименте использовали конические колбы Эрленмейера объёмом 0,25 л, заполненные суспензией микроводорослей на 4/5 от своего максимального объёма, чтобы обеспечить эффективную поверхность поглощения. Объём готового раствора суспензии для каждой из проб составил 0,2 л.

Уровень pH на протяжении эксперимента для всех проб находился в диапазоне 6,0–7,5.

Характеристика изменений культуры.

Концентрацию клеток микроводорослей в суспензии определяли по показателю оптической плотности на спектрофотометре B-1200 ЭКОВЬЮ (Shanghai Mapada Instruments Co., Ltd., Китай): толщина стенки кюветы – 10 мм, длина волны – 560 нм [14]. Периодичность контроля составляла 1 раз в трое суток. Начальная оптическая плотность готовых суспензий находилась в диапазоне 0,1–0,4 ед.

С целью оценки жизнеспособности и устойчивости исследуемых культур микроводорослей к повышенным концентрациям углекислого газа в процессе эксперимента осуществляли визуальный анализ проб и микроскопирование с использованием микроскопа марки Carl Zeiss и увеличений $\times 400$ и $\times 800$.

Статистический анализ. Результаты исследования представлены как средние арифметические значения и стандартное отклонение трёх аналитических повторов. Стати-

стическую значимость оптической плотности оценивали с помощью t-критерия Стьюдента, во всех случаях значение $p \leq 0,05$ считалось значимым. Для представления данных использовали уровень достоверности 95%.

Результаты и обсуждение

В условиях данного экспериментального исследования основным источником углерода для микроводорослей являлся углекислый газ, присутствующий в газовой среде, окружающей культивационную ёмкость. Растворение углекислого газа в суспензии микроводорослей достигалось путём поддержания температуры (35 °C) и уровня pH (6,0–7,5).

В процессе поглощения углекислого газа микроводорослями оптическая плотность культур возрастила, что свидетельствовало об интенсивном фотосинтезе и росте микроводорослей. Таким образом, высокая скорость увеличения оптической плотности культуры

Таблица 1 / Table 1

Сравнение динамики изменения оптической плотности культур при их насыщении CO_2 в концентрации 5% с контрольной группой / The dynamics of the optical density of the tested samples when they were cultivated under conditions of a 5% CO_2 content and a control sample

Сут- ки Day	Культура № 1 Culture No. 1			Культура № 2 Culture No. 2			Культура № 3 Culture No. 3			Культура № 4 Culture No. 4		
	O	K	Δ	O	K	Δ	O	K	Δ	O	K	Δ
0	0,359	0,359	0	0,293	0,293	0	0,100	0,100	0	0,387	0,387	0
5	0,445	0,375	19	0,269	0,271	-1	0,145	0,100	45	0,436	0,396	10
8	0,421	0,360	17	0,213	0,198	8	0,192	0,139	38	0,435	0,323	35
11	0,307	0,280	10	0,224	0,137	64	0,237	0,129	84	0,466	0,326	43
12	0,263	0,282	-7	0,232	0,163	42	0,219	0,119	84	0,457	0,327	40
15	0,285	0,272	5	0,224	0,140	60	0,318	0,125	154	0,467	0,303	54
18	0,308	0,293	5	0,225	0,144	56	0,381	0,141	170	0,475	0,303	57
22	0,391	0,304	29	0,208	0,159	31	0,436	0,139	214	0,525	0,300	75
26	0,424	0,277	53	0,190	0,212	-10	0,474	0,149	218	0,525	0,339	55
29	0,481	0,290	66	0,211	0,219	-4	0,505	0,147	244	0,518	0,378	37
33	0,553	0,296	87	0,191	0,226	-15	0,570	0,153	273	0,558	0,392	42
36	0,594	0,334	77	0,203	0,218	-7	0,630	0,174	262	0,576	0,443	30
39	0,607	0,307	98	0,198	0,238	-17	0,597	0,163	266	0,576	0,434	33
43	0,673	0,309	118	0,221	0,238	-7	0,631	0,163	287	0,668	0,418	60
50	0,847	0,363	125	0,304	0,273	11	0,715	0,186	284	0,738	0,472	56
54	0,738	0,344	115	0,349	0,259	35	0,738	0,180	310	0,708	0,452	57
57	0,855	0,378	126	0,369	0,288	28	0,809	0,208	289	0,762	0,462	65
60	0,786	0,349	125	0,327	0,274	19	0,752	0,186	304	0,692	0,438	58
61	0,841	0,382	120	0,346	0,306	13	0,825	0,194	325	0,773	0,478	62
63	0,841	0,382	120	0,345	0,306	13	0,825	0,194	325	0,773	0,478	62
66	0,862	0,384	124	0,402	0,304	32	0,911	0,200	356	0,760	0,417	82

Примечание: O – опытная проба, K – контроль, Δ – разница в %.

Note: O – test sample, K – control sample, Δ – percentage difference.

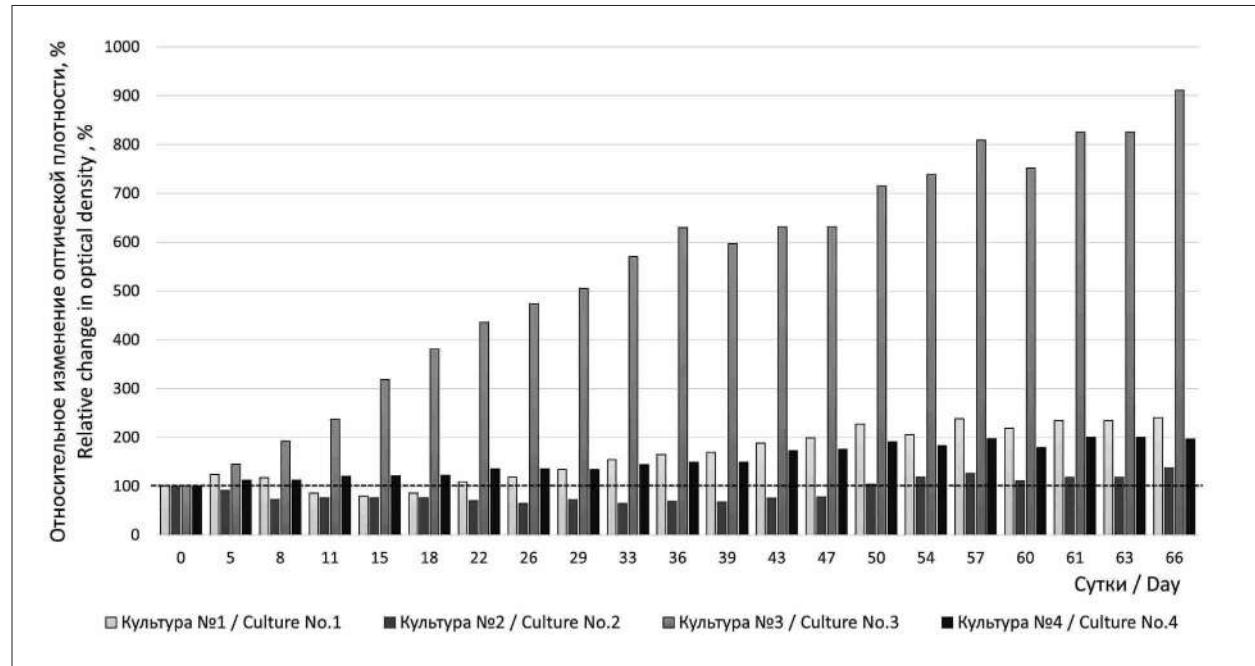


Рис. 5. Динамика относительного изменения оптической плотности культур при концентрации CO_2 5% / **Fig. 5.** Dynamics of relative change in the optical density of cultures at 5% CO_2 content

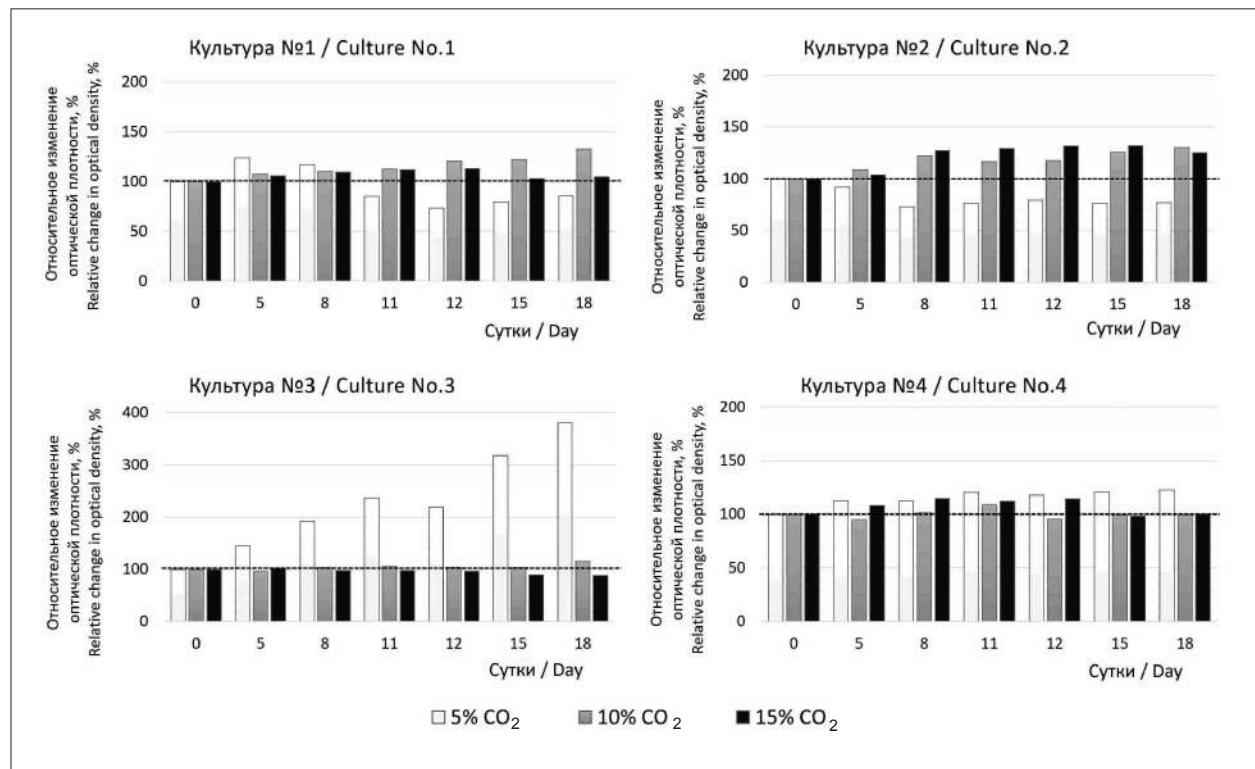


Рис. 6. Динамика относительного изменения оптической плотности культур при концентрациях CO_2 от 5 до 15% / **Fig. 6.** Dynamics of relative change in the optical density of cultures at CO_2 content from 5 to 15%

Таблица 2 / Table 2

Средние скорости роста культур (ед. опт. плотн./сут) при концентрациях CO_2 от 0,03 до 15%
Average growth rates (units of opt. density/day) of cultures at CO_2 content from 0.03 to 15%

Объект исследования Test object	0,03% CO_2	5% CO_2	10% CO_2	15% CO_2
Культура № 1 Culture No. 1	0,0	0,0076±0,0003	0,0157±0,0007	0,0
Культура № 2 Culture No. 2	0,0	0,0	0,0067±0,0006	0,0077±0,0011
Культура № 3 Culture No. 3	0,0015±0,0003	0,01230±0,00015	0,0076±0,0006	-0,0072±0,0006
Культура № 4 Culture No. 4	0,00140±0,00021	0,00562±0,00008	0,0	0,0

указывала на высокую скорость биофиксации углекислого газа.

В таблице 1 показано сравнение динамики оптической плотности культур №№ 1–4 при их выращивании в условиях с 5% содержанием углекислого газа (опытные пробы) и в условиях атмосферного воздуха (контрольные пробы).

Результаты, представленные в таблице 1, демонстрируют, что рост оптической плотности культур микроводорослей в условиях с 5% содержанием углекислого газа происходит быстрее, чем в условиях атмосферного воздуха. Особенно заметен этот эффект в культуре № 3, где разница между опытными и контрольными условиями оказалась наибольшей (356%).

Продолжительность культивирования микроводорослей при 5% CO_2 составила 66 суток, что было обусловлено необходимостью фиксации адаптационной и экспоненциальной фаз роста культур. Подробно результаты данного этапа эксперимента были представлены в предыдущей публикации авторов [15]. Динамика изменения оптической плотности опытных образцов культур относительно исходных значений при их насыщении углекислым газом в концентрации 5% представлена на рисунке 5.

По истечении 66 суток культивирования наибольший рост биомассы по относительному изменению оптической плотности суспензии наблюдался в культуре № 3. При этом оптическая плотность культуры изменилась с 0,1 до 0,911 ед. (более чем в 9 раз).

Дальнейшее культивирование опытных проб культур микроводорослей при концентрациях углекислого газа 10 и 15% проводили в течение 18 сут, что превышало выявленные периоды адаптации в эксперименте с 5%-ным содержанием CO_2 .

Результаты культивирования микроводорослей при концентрациях CO_2 5, 10 и 15% представлены на рисунке 6. Диаграммы показывают изменение оптической плотности культур № 1–№ 4 относительно начальных значений, измеренных в первые сутки после изменения концентрации CO_2 , что позволяет оценить влияние различных концентраций CO_2 на рост микроводорослей.

При повышении концентрации CO_2 до 10% стабильный рост биомассы отмечается только в культуре № 1. Во всех остальных культурах явного стимулирующего или ингибирующего воздействия газа не прослеживается. Похожая ситуация наблюдается при повышении концентрации CO_2 до 15% – ни в одной из культур стимулирующего действия не отмечено.

В таблице 2 представлены средние скорости роста оптической плотности культур микроводорослей при различных концентрациях CO_2 .

Результаты, представленные в таблице 2, позволяют определить значение концентрации CO_2 , позволяющее достичь максимальную скорость роста биомассы в каждой из культур микроводорослей. Так, для культур № 3 и № 4 добавление CO_2 в концентрации 5% является оптимальным; для культуры № 1 наиболее предпочтительным является содержание CO_2 в концентрации 10%; а для культуры № 2 – 15%. При этом наибольшие средние скорости роста в ходе эксперимента были зафиксированы у культур № 1 и № 3 (0,0157±0,0007 и 0,01230±0,00015 ед. опт. плотн./сут соответственно), что указывает на их высокую скорость биофиксации CO_2 и делает перспективными для выращивания с целью декарбонизации промышленных выбросов.

По результатам эксперимента, после 102 дней культивирования биомасса микроводорослей увеличилась в культуре № 1 в 3 раза, в культуре № 2 – в 2 раза, в культуре № 3 – в 9 раз и в культуре № 4 – в 2 раза.

В ходе микроскопического анализа проб в течение эксперимента была зафиксирована видовая изменчивость биоценозов культур, которая была вызвана адаптацией штаммов и консорциумов к новым условиям. В культурах №№ 1–3 стали преобладать клетки зелёных микроводорослей небольшого размера и неправильной формы. Ввиду того, что культивирование осуществлялось в открытых условиях с использованием консорциумов из окружающей среды, во всех культурах прослеживалось бактериальное загрязнение и развитие одиночных простейших (на финальной стадии эксперимента). В единичном случае в культуре № 4 были встречены коловратки.

Согласно литературным данным [16], присутствие бактерий в культуре микроводорослей может влиять на биохимический состав биомассы, а также стимулировать или подавлять рост клеток. При высокой производительности микроводорослей бактерии с помощью ферментов улучшают обмен веществ между клеткой микроводоросли и окружающей средой, а при низкой производительности – высокая бактериальная нагрузка приводит к угнетению микроводорослей. Простейшие микроорганизмы также играют важную роль в продуктивности микроводорослей, поскольку, являясь хищниками, они регулируют численность клеток водорослей.

Заключение

Экспериментальные исследования по выращиванию четырёх культур микроскопических водорослей в газовой среде с содержанием углекислого газа от 5 до 15% подтвердили эффективность использования повышенных концентраций углекислого газа для стимуляции роста микроводорослей. Наилучшие результаты были зафиксированы в культуре микроводорослей, выделенной из эвтрофированного пресного водоёма: за 66 суток культивирования при 5% CO₂ концентрация клеток в культуре увеличилась более чем в 9 раз (с 0,1 до 0,911 ед. оптической плотности). В результате эксперимента были получены значения концентраций CO₂, при которых наблюдается ускоренный рост биомассы в каждой из четырёх исследуемых культур. Наибольшие средние скорости роста

были зафиксированы при концентрации CO₂ 5% в культуре, выделенной из эвтрофированного пресного водоёма – 0,01230±0,00015 ед. опт. плотн./сут и при концентрации CO₂ 10% в культуре, выделенной из лишайников хвойных деревьев – 0,0157±0,0007 ед. опт. плотн./сут. Проведённые исследования демонстрируют высокий потенциал применения микроскопических водорослей в качестве эффективного способа утилизации углекислого газа, что имеет важное значение для реализации политики декарбонизации в Российской Федерации. Следующим этапом исследований в данном направлении будет использование культур микроводорослей для очистки дымовых газов, содержащих диоксид углерода, а также тестирование эффективных методов сбора и переработки полученной биомассы.

Литература

1. Шевелева Н.А. Управление выбросами парниковых газов на предприятии // Экология производства. 2023. № 11. С. 74–81.
2. Киселева С.В., Чернова Н.И., Власкин М.С. Поглощение углекислого газа микроводорослями: анализ технологий и энергетических затрат // Теплоэнергетика. 2024. № 12. С. 17–29. doi: 10.56304/S0040363624700504
3. Кулабухов В.Ю., Калякин Д.О., Мальцевская Н.В. Перспективы использования микроводорослей для поглощения CO₂ из дымовых газов промышленных предприятий // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 9. С. 4–8. doi: 10.18412/1816-0395-2016-9-4-8
4. Минюк Г.С., Дробецкая И.В., Чубчикова И.Н., Терентьева Н.В. Одноклеточные водоросли как возобновляемый биологический ресурс: обзор // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7. № 2. С. 5–23.
5. Чернова Н.И., Киселева С.В., Коробкова Т.П., Зайцев С.И. Микроводоросли в качестве сырья для получения биотоплива // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 9 (65). С. 68–74.
6. Chunzhuk E.A., Grigorenko A.V., Kiseleva S.V., Chernova N.I., Ryndin K.G., Kumar V., Vlaskin M.S. The influence of elevated CO₂ concentrations on the growth of various microalgae strains // Plants. 2023. V. 12. No. 13. Article No. 2470. doi: 10.3390/plants12132470
7. Kryvenda A., Tischner R., Steudel B. Testing for terrestrial and freshwater microalgae productivity under elevated CO₂ conditions and nutrient limitation // BMC Plant Biology. 2023. V. 23. Article No. 27. doi: 10.1186/s12870-023-04042-z
8. Chunzhuk E.A., Grigorenko A.V., Chernova N.I., Kiseleva S.V., Ryndin K.G., Popel O.S., Malaniy S.Y., Slavkina O.V., de Farias N. F., Leng L., Kumar V., Vlaskin M.S.

- Direct study of CO₂ capture efficiency during microalgae *Arthrospira platensis* cultivation at high CO₂ concentrations // Energies. 2023. V. 16. No. 2. Article No. 822. doi: 10.3390/en16020822
9. Нургалиев Р., Славкина О. Технология утилизации дымовых газов с помощью микроводорослей и их переработка в бионефть // Энергетическая политика. 2024. № 1 (192). С. 28–37. doi: 10.46920/2409-5516_2024_1192_28
10. Kong W., Kong J., Feng S., Yang T., Xu L., Shen B., Bi Y., Lyu H. Cultivation of microalgae–bacteria consortium by waste gas–waste water to achieve CO₂ fixation, wastewater purification and bioproducts production // Biotechnol. Biofuels. 2024. V. 17. Article No. 26. doi: 10.1186/s13068-023-02409-w
11. Домрачева Л.И., Ковина А.Л., Кондакова Л.В., Ашихмина Т.Я. Цианобактериальные симбиозы и возможность их практического использования (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 21–30. doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-021-030
12. Dong H., Liu W., Zhang H., Wang Zh., Feng F., Zhou L., Duan H., Xu T., Li X., Ma J. Enhanced biomass production and wastewater treatment in attached co-culture of *Chlorella pyrenoidosa* with nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter beijerinckii* // Bioprocess Biosyst. Eng. 2023. No. 46. P. 707–716. doi: 10.1007/s00449-023-02855-8
13. Среда Тамия, модиф. Отдел молекулярных биосистем: Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН [Электронный ресурс] https://cellreg.org/Catalog_2020/Catalog%20NEW/media/2.Tamia.html (Дата обращения: 27.02.2025).
14. Myers J., Curtis B., Curtis W. Improving accuracy of cell and chromophore concentration measurements using optical density // BMC Biophysics. 2013. V. 6. Article No. 4. doi: 10.1186/2046-1682-6-4
15. Белик Е.С., Соловьева А.С., Мактиева С.М., Рудакова Л.В. Оценка эффективности биофиксации углерода различными культурами микроводорослей // BIOAsia Altai 2024: Материалы IV Международного биотехнологического форума, Барнаул, 23–28 сентября 2024 года. Барнаул: Алтайский государственный университет, 2024. С. 381–384.
16. Zhang Y., Su H., Zhong Y., Zhang C., Shen Z., Sang W., Yan G., Zhou X. The effect of bacterial contamination on the heterotrophic cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* in wastewater from the production of soybean products // Water Res. 2012. V. 46. No. 17. P. 5509–5516. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.025
1. Sheveleva N. A. Management of greenhouse gas emissions at the enterprise // Ekologiya proizvodstva. 2023. No. 11. P. 74–81 (in Russian).
2. Kiseleva S.V., Chernova N.I., Vlaskin M.S. Carbon dioxide absorption by microalgae: analysis of technologies and energy costs // Thermal Engineering. 2024. No. 12. P. 17–29 (in Russian). doi: 10.56304/S0040363624700504
3. Kulabuhov V.Yu., Karyakin D.O., Mal'cevskaya N.V. Prospects for the Use of Microalgae to Absorb CO₂ from the Flue Gases of Industrial Enterprises // Ecology and industry of Russia. 2016. V. 20. No. 9. P. 4–8 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2016-9-4-8
4. Minyuk G.S., Drobeckaya I.V., Chubchikova I.N., Terent'eva N.V. Unicellular algae as renewable biological resource: A review // Marine ecological journal. 2008. V. 7. No. 2. P. 5–23 (in Russian).
5. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Korobkova T.P., Zaytsev S.I. Microalgae as source for biofuels // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2008. No. 9 (65). P. 68–74 (in Russian).
6. Chunzhuk E.A., Grigorenko A.V., Kiseleva S.V., Chernova N.I., Ryndin K.G., Kumar V., Vlaskin M.S. The influence of elevated CO₂ concentrations on the growth of various microalgae strains // Plants. 2023. V. 12. No. 13. Article No. 2470. doi: 10.3390/plants12132470
7. Kryvenda A., Tischner R., Steudel B. Testing for terrestrial and freshwater microalgae productivity under elevated CO₂ conditions and nutrient limitation // BMC Plant Biology. 2023. V. 23. Article No. 27. doi: 10.1186/s12870-023-04042-z
8. Chunzhuk E.A., Grigorenko A.V., Chernova N.I., Kiseleva S.V., Ryndin K.G., Popel O.S., Malaniy S.Y., Slavkina O.V., de Farias N. F., Leng L., Kumar V., Vlaskin M.S. Direct study of CO₂ capture efficiency during microalgae *Arthrospira platensis* cultivation at high CO₂ concentrations // Energies. 2023. V. 16. No. 2. Article No. 822. doi: 10.3390/en16020822
9. Nurgaliev R., Slavkina O. Technology for flue gases utilization using microalgae and processing microalgae biomass into bio-oil // Energy Policy. 2024. No. 1 (192). P. 28–37 (in Russian). doi: 10.46920/2409-5516_2024_1192_28
10. Kong W., Kong J., Feng S., Yang T., Xu L., Shen B., Bi Y., Lyu H. Cultivation of microalgae–bacteria consortium by waste gas–waste water to achieve CO₂ fixation, wastewater purification and bioproducts production // Biotechnol. Biofuels. 2024. V. 17. Article No. 26. doi: 10.1186/s13068-023-02409-w
11. Domracheva L.I., Kovina A.L., Kondakova L.V., Ashihmina T.Ya. Cyanobacterial symbioses and their practical use (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 21–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-021-030
12. Dong H., Liu W., Zhang H., Wang Zh., Feng F., Zhou L., Duan H., Xu T., Li X., Ma J. Enhanced biomass production and wastewater treatment in attached co-culture of *Chlorella pyrenoidosa* with nitrogen-fixing bacteria *Azotobacter beijerinckii* // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2023. No. 46. P. 707–716. doi: 10.1007/s00449-023-02855-8

References

1. Sheveleva N. A. Management of greenhouse gas emissions at the enterprise // Ekologiya proizvodstva. 2023. No. 11. P. 74–81 (in Russian).
2. Kiseleva S.V., Chernova N.I., Vlaskin M.S. Carbon dioxide absorption by microalgae: analysis of technologies

13. Sreda Tamiya, modif. Department of Molecular Biosystems: K.A. Timiriazev Institute of Plant Physiology Russian Academy of Science [Internet resource] https://cellreg.org/Catalog_2020/Catalog%20NEW/media/2/Tamia.html (Accessed: 27.02.2025).
14. Myers J., Curtis B., Curtis W. Improving accuracy of cell and chromophore concentration measurements using optical density // BMC Biophysics. 2013. V. 6. Article No. 4. doi: 10.1186/2046-1682-6-4
15. Belik E.S., Solov'eva A.S., Maktieva S.M., Rudakova L.V. Evaluation of the biofixation efficiency of different microalgae cultures // BIOAsia Altai 2024: Materialy IV Mezhdunarodnogo biotekhnologicheskogo foruma, Barnaul, 23–28 sentyabrya 2024 goda. Barnaul: Altajskij gosudarstvennyj universitet, 2024. P. 381–384 (in Russian).
16. Zhang Y., Su H., Zhong Y., Zhang C., Shen Z., Sang W., Yan G., Zhou X. The effect of bacterial contamination on the heterotrophic cultivation of *Chlorella pyrenoidosa* in wastewater from the production of soybean products // Water Res. 2012. V. 46. No. 17. P. 5509–5516. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.025