



БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

BIOLOGICAL RESOURCES

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-525-538

EDN: JBKZLA

УДК 631.8

Научная статья / Research article

Использование биомассы микроскопических водорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в качестве органического удобрения

А.С. Соловьева^{ID}✉, Е.С. Белик^{ID}, Л.В. Рудакова^{ID}, Е.И. Носкова^{ID},
А.В. Белых^{ID}

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,

Российская Федерация

✉alyona.solovyova@mail.ru

Аннотация. Использование микроводорослей, выращенных при утилизации CO₂ из дымовых газов, в качестве органических удобрений открывает новые перспективы одновременного решения двух важнейших проблем современности: декарбонизации производственных процессов (через сокращение выбросов CO₂ от сжигания топлива) и интенсификации аграрного сектора (посредством повышения производительности сельскохозяйственных культур). С учетом наличия разработанных технологий утилизации CO₂ из дымовых газов, являющихся непрерывным источником наращивания микроскопических водорослей, важно оценить возможность использования полученной биомассы для применения в качестве удобрений. Исследованы два вида биоудобрений на основе двух культур микроводорослей *Chlorella* sp., выращенных в присутствии дымового газа. Первая культура была получена из биопрепарата торговой марки «Spirulinafood». Вторая культура являлась консорциумом зеленых микроводорослей различных видов с преобладанием *Chlorella* sp. и была выделена из водоема. Исследование эффективности биоудобрений показало увеличение длины и массы надземных проростков рапса. Наилучшие условия применения включали разведение растворов с содержанием биомассы 2,4–2,8 г/дм³ и оптической плотностью 1,3–1,5 ед. в соотношении 1:9, что обеспечивало увеличение длины проростков на 13 % и массы на 13 %. Использование биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp. (биопрепарата торговой марки «Spirulinafood») позволило повысить энергию прорастания и процент всхожести семян на 6 %, а элементный анализ его состава выявил повышенное содержание магния и фосфора. Полученные результаты

© Соловьева А.С., Белик Е.С., Рудакова Л.В., Носкова Е.И., Белых А.В., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

подтверждают перспективность дальнейших исследований и включения биоудобрения из микроводорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в современные агротехнологические процессы.

Ключевые слова: биоудобрение, микроводоросли, *Chlorella* sp., всхожесть, энергия прорастания

Вклад авторов. Рудакова Л.В. — концептуализация, научное руководство исследованием; Соловьева А.С., Белик Е.С. — разработка методологии исследования, формальный анализ данных, написание черновика рукописи, визуализация; Носкова Е.И., Белых А.В. — проведение экспериментов, курирование данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 14.05.2025; доработана после рецензирования 09.06.2025; принята к публикации 23.06.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Соловьева А.С., Белик Е.С., Рудакова Л.В., Носкова Е.И., Белых А.В. Использование биомассы микроскопических водорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в качестве органического удобрения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 525–538. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-525-538>

Possibility of using biomass of microscopic algae cultivated under flue gas conditions as an organic fertilizer

Alyona S. Solovyova^{ID}✉, Ekaterina S. Belik^{ID}, Larisa V. Rudakova^{ID},
Elizaveta I. Noskova^{ID}, Anastasiya V. Belykh^{ID}

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
✉alyona.solovyova@mail.ru

Abstract. The use of microalgae grown during the utilization of CO₂ from flue gases as organic fertilizers opens up new perspectives for simultaneously solving two of the most significant problems of our time — decarbonizing production processes (by reducing CO₂ emissions from fuel combustion) and enhancing the agricultural sector's productivity (through increasing crop yields). Given the availability of developed technologies for the disposal of CO₂ from flue gases, which are a continuous source of microscopic algae growth, it is important to explore the possibility of using the resulting biomass for use as fertilizer. Two types of biofertilizers based on two cultures of microalgae *Chlorella* sp. grown in the presence of flue gas were studied. The first culture was obtained from the biological agents «Spirulinafood». The second culture was a consortium of green microalgae of various species, with a predominance of *Chlorella* sp. It was isolated from a freshwater pond. A study of the effectiveness of biofertilizers has shown an increase in the length and weight of aboveground rapeseed seedlings. The optimal application conditions include dilution of the solutions with a biomass content of 2.4–2.8 g/dm³ and an optical density of 1.3–1.5, in a ratio of 1:9. This provides an increase

in seedling length by 13% and weight by 13%. The use of biofertilizer from a pure culture of *Chlorella* sp. (the biological agents «Spirulinafood») allowed to increase seed germination energy by 6% and the percentage of seed germination, and an elemental analysis revealed an increase in the content of magnesium and phosphorus in the composition of the fertilizer. The results obtained confirm the prospects for further research and the inclusion of biofertilizers from microalgae cultivated in flue gas conditions in modern agrotechnological processes.

Keywords: biofertiliser, microalgae, *Chlorella* sp., germination, germination energy

Authors' contribution. L.V. Rudakova — conceptualization, scientific management of research; A.S. Solovyova, E.S. Belik — development of research methodology, formal data analysis, writing a draft manuscript, visualization; E.I. Noskova, A.V. Belykh — conducting experiments, curating data. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 14.05.2025; revised 09.06.2025; accepted 23.06.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Solovyova AS, Belik ES, Rudakova LV, Noskova EI, Belykh AV. Possibility of using biomass of microscopic algae cultivated under flue gas conditions as an organic fertilizer. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):525–538. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-525-538>

Введение

За последние десятилетия мировой рынок минеральных удобрений продемонстрировал пятикратное увеличение, достигнув совокупной стоимости свыше 70 млрд долл. [1]. Основу данной отрасли составляют фосфорные, азотные и калийные удобрения, чрезмерное или неправильное применение которых влечет целый ряд негативных экологических последствий. К ним относятся вымывание питательных элементов из почвы, ее уплотнение, снижение пористости и закисление, загрязнение поверхностных и подземных вод, эвтрофикация, неконтролируемые выбросы парниковых газов в атмосферу, нахождение в почве тяжелых металлов и других токсичных соединений [2; 3]. Миграция азота и фосфора из минеральных удобрений начинается сразу после их внесения в почву [4]. Около 40 % общего объема азота ассимилируют растения, а остальная часть вымывается атмосферными осадками или улетучивается в виде газовых выбросов. Сырец, используемое для получения минеральных удобрений, содержит тяжелые металлы, такие как уран, стронций, цинк, кадмий, свинец, ртуть, которые попадают в удобрения, постепенно аккумулируются в почвенной структуре и сельскохозяйственных растениях, обуславливая потенциальные риски возникновения патологических состояний у человека [2].

Органические удобрения, в свою очередь, отличаются содержанием специального органического вещества — ценного элемента, улучшающего структуру почвы. Они разлагаются в почве постепенно, посредством микро-

биологических процессов, при этом обеспечивая непрерывное насыщение растений питательными веществами. Наиболее часто в качестве органических удобрений используют птичий помет, навоз сельскохозяйственных животных, ил, торф, компост, костную муку. Перспективным для удобрения почв является использование биомассы микроскопических водорослей [5; 6].

Микроводоросли способны повысить плодородие почвы и увеличить выход сельскохозяйственной продукции. Согласно исследованиям [7], альголизация почвы с использованием микроводорослей *Nostoc* sp., *Cylindrospermum* sp. и *Anabaena* sp. для посадки огурцов в теплицах привела к увеличению роста растений на 30,5–46,4 %, количества соцветий на 12,3–44,4 % и плодов на 27,0 %.

Микроводоросли служат источником биологически значимых метаболитов, активно участвующих в почвообразовательных процессах, способствуют нормализации pH почвы и повышению влагоемкости. Кроме того, они являются продуcentами антибиотически активных веществ, которые благоприятно влияют на рост и развитие высших растений. После внесения в почву микроводоросли продолжают свой рост, достигая увеличения массы в 10–15 раз [8]. Биомасса микроводорослей разлагается быстрее растительных остатков, что делает органическое вещество более доступным, способствует легкой минерализации почв в течение вегетации и активизирует биологические процессы в почве.

Согласно экспериментальным данным в мелкоделяночном опыте на темно-серых лесных почвах [9], обработка семян ячменя суспензией *Chlorella vulgaris* и внесение микроводоросли *Chlorella vulgaris* в почву позволили увеличить урожайность с 22,8 до 45,6 ц/га соответственно. В работе [10] при альголизации почв установлено значительное возрастание содержания гуминовых кислот на сероземах (до 45–55 %), возникшее в результате интенсивного развития микробиоценозов и образования легкоусвояемых органических соединений.

Другое важное свойство микроводорослей, имеющее практическое значение в экологизации промышленных процессов, заключается в высокой эффективности фиксации диоксида углерода в процессе фотосинтеза. Эта особенность позволяет применять микроводоросли для снижения концентрации CO₂ в дымовых газах, возникающих при сжигании топлива. Разработанные технологии очистки газовых выбросов [11–13] обеспечивают постоянное наращивание биомассы микроводорослей, которую впоследствии можно эффективно использовать в качестве удобрения для повышения плодородия почв.

Таким образом, разработка технологической схемы, включающей культивирование биомассы микроводорослей в ходе очистки дымовых газов от CO₂ с последующей утилизацией полученного продукта в виде биоудобрений, позволит сформировать экологически устойчивый производственный процесс, обеспечивающий снижение эмиссии углекислого газа в атмосферу,

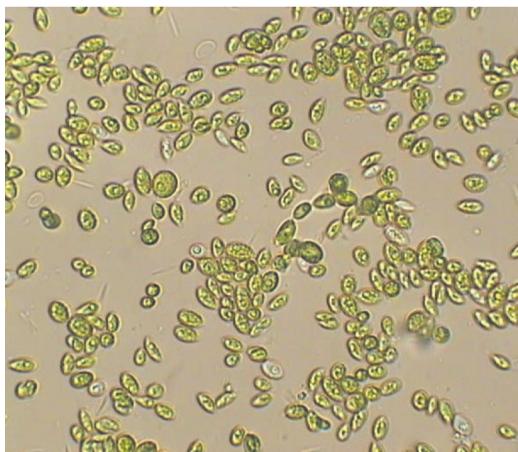
повышение плодородия почв и восстановление естественного углеродного цикла.

Данная работа посвящена оценке возможности использования биомассы микроскопических водорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в качестве органического удобрения. **Цель исследования** — экспериментальное обоснование применения биомассы микроводорослей, культивируемых в среде, обогащенной дымовыми газами, в качестве органического удобрения для повышения витальных и морфофизиологических показателей семян рапса, а также определение эффективной дозировки его внесения.

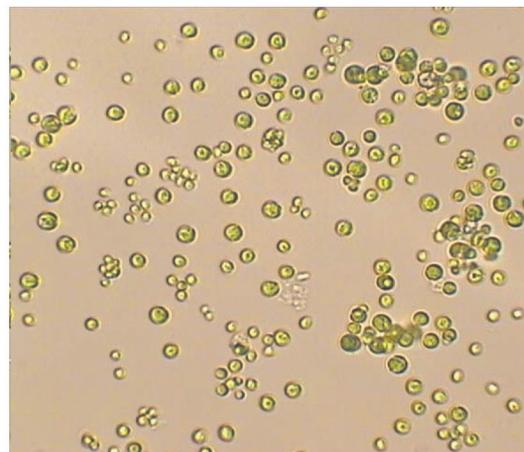
Объекты и методы исследования

В работе исследовали два вида биоудобрений, полученных путем культивирования двух культур микроводорослей в условиях дымового газа. Газовая смесь характеризовалась следующим составом: O_2 — 12,8 %, CO_2 — 7,8 %, CO — 1,2 %, SO_2 — менее 0,02 %, NO_x — менее 0,01 %, H_2S — менее 0,001 %. В качестве первой культуры использовали чистый штамм микроводоросли рода *Chlorella*, полученный из биопрепарата — БАД на основе микроводорослей *Chlorella* sp. компании «Spirulinafood». Вторая культура была выделена из природной среды (пресный водоем в Пермском крае) и представляла собой консорциум зеленых микроводорослей различных видов с преобладанием *Chlorella* sp. (рис. 1).

Данные культуры микроводорослей были выбраны на основании прошлых исследований авторов как культуры, показавшие высокий потенциал в биофиксации углекислого газа [14].

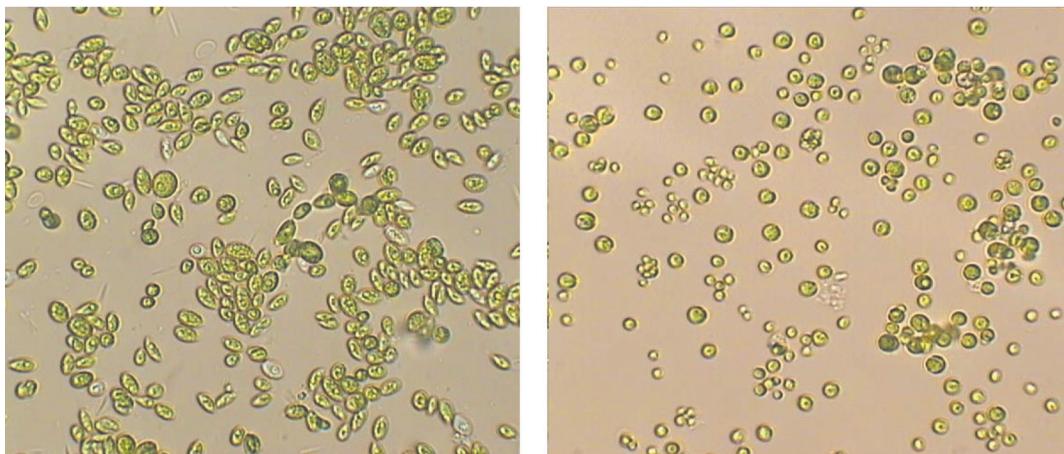


Чистый штамм *Chlorella* sp.,
полученный из биопрепарата
«Spirulinafood»



Консорциум *Chlorella* sp.,
выделенный из природной
среды

Рис. 1. Микрофотографии культур микроводорослей после воздействия дымового газа
Источник: составлено А.С. Соловьевой.



A pure strain of *Chlorella* sp., obtained from biological agents from «Spirulinafood»

Chlorella sp. consortium isolated from the environment

Figure 1. Microphotographs of microalgae cultures after exposure to flue gases
Source: compiled by the A.S. Solovyova.

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, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,00181, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,000222, MoO_3 — 0,000018, NH_4VO_3 — 0,000023¹.

В данном исследовании рассматривается эффективность применения биоудобрений из микроводорослей при проращивании семян рапса. Рапс является агрономически значимой культурой с высокой чувствительностью к условиям прорастания и доступности питательных веществ. Его семена быстро реагируют на биологически активные вещества, что позволяет достоверно оценить влияние биоудобрений на витальные и морфофизиологические показатели.

Схема проведения эксперимента включала контрольный образец (семена, обработанные дистиллированной водой) и опытные образцы для каждой из культур микроводорослей: варианты с разбавлениями 1:9, 1:12 и 1:15 для биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp. и для биоудобрения из природного консорциума микроводорослей *Chlorella* sp.

Для разбавления биоудобрений использовали дистиллированную воду. Оптическая плотность (концентрация клеток) неразбавленных культур микроводорослей варьировалась в диапазоне 1,3–1,5 ед., сухой вес биомассы составлял 2,4–2,8 г/дм³.

¹ Среда Тамия, модиф. / Отдел молекулярных биосистем ; Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН. URL: https://cellreg.org/Catalog_2020/Catalog%20NEW/media/2.Tamia.html (дата обращения: 27.02.2025).

Выбор разбавлений 1:9, 1:12 и 1:15 для проведения эксперимента аргументирован учетом равновесия между концентрацией биомассы и возможностью проявления токсичности (сuspензия микроводорослей с содержанием биомассы по сухому весу 2,4–2,8 г/дм³ является высококонцентрированной и способна вызывать токсический эффект вследствие избытка органических веществ, аминокислот и солей); кроме того, учтены перспективы построения градиента концентраций для определения пороговой дозы внесения (при которой начинает проявляться стимулирующее действие), оптимальной дозы внесения (при которой наблюдается максимальный стимулирующий эффект) и максимально приемлемой дозы внесения (не приводящей к угнетению); а также учтены возможности реализации сравнительного анализа эффективности (разбавления подобраны таким образом, чтобы включить низкие, средние и высокие концентрации внесения, что важно для оценки экономической целесообразности).

Семена рапса проращивали в соответствии с методикой ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». Влияние различных концентраций биоудобрений оценивали по следующим показателям: энергия прорастания семян, всхожесть, длина проростков, масса проростков и масса корней.

Элементный состав биомассы устанавливали посредством метода рентгеноспектрального микроанализа, используя сканирующий электронный микроскоп модели S-3400N производства компании Hitachi, оснащенный приставкой для энергодисперсионного анализа от фирмы Bruker.

Фазовый состав изучаемых образцов оценивали с применением рентгеновского дифрактометра марки XRD-7000 японского производителя Shimadzu. Анализ полученных рентгенограмм выполнялся с помощью специализированного программного комплекса «XRD 6000/7000 Версия 5.21».

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных исследований показали, что биомасса микроводорослей, культивируемых в среде, обогащенной дымовыми газами, обладает потенциалом биоудобрения, способного положительно влиять на витальные и морфофизиологические показатели проростков рапса (табл.).

При внесении биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp. во всех исследуемых разбавлениях (от 1:9 до 1:15), а также биоудобрения из природного консорциума *Chlorella* sp. в разведениях 1:9 и 1:12 наблюдался прирост массы зеленых частей растений по сравнению с контрольными ростками. При этом увеличение длины надземной части трехдневного проростка зафиксировано при использовании разбавления 1:9 для биомассы чистой культуры *Chlorella* sp. и разбавлений 1:9, 1:12 для биомассы природного консорциума *Chlorella* sp. Наибольший зафиксированный прирост длины трехдневных проростков

составил 3 мм (13 %) при применении обеих культур в разбавлениях 1:9, а наибольший прирост массы трехдневных проростков — 10 мг (13 %) при использовании чистой культуры *Chlorella* sp. в разведении 1:9.

Кроме того, чистая культура *Chlorella* sp. в разбавлении 1:9 продемонстрировала положительное влияние на ключевые характеристики процесса проращивания семян рапса: энергия прорастания и процент всхожести повысились на 6 % относительно контроля.

Витальные и морфофизиологические показатели ростков рапса после взаимодействия с удобрениями из микроводорослей, насыщенными дымовым газом

Вариант	Разбавление	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Длина трехдневного проростка, мм	Трехдневные проростки	
					Масса надземного ростка, мг	Масса корня, мг
Контроль	—	61	91	24 ± 7	26 ± 7	4 ± 2
Чистая культура <i>Chlorella</i> sp.	1:9	67 (↑ 6 %)	97 (↑ 6 %)	27 ± 5 (↑ 13 %)	36 ± 12 (↑ 13 %)	3 ± 2
	1:12	47	81	23 ± 4	31 ± 9	3 ± 1
	1:15	40	77	21 ± 5	29 ± 8	4 ± 1
Консорциум <i>Chlorella</i> sp., выделенный из природной среды	1:9	37	91	27 ± 4 (↑ 13 %)	33 ± 7	4 ± 2
	1:12	20	80	25 ± 6	32 ± 8	4 ± 3
	1:15	12	91	22 ± 8	24 ± 8	3 ± 3

Источник: составлено А.С. Соловьевой, Е.И. Носковой, А.В. Белых.

Vital and morphophysiological parameters of rapeseed sprouts after interaction with microalgae fertilizers saturated with flue gas

Sample	Dilution	Germination Energy, %	Germination, %	Length a three-day-old seedling, mm	Three-day-old seedlings	
					The mass of the above-ground sprout, mg	Weight root, mg
Control	—	61	91	24 ± 7	26 ± 7	4 ± 2
Pure culture of <i>Chlorella</i> sp.	1:9	67 (↑ 6 %)	97 (↑ 6 %)	27 ± 5 (↑ 13 %)	36 ± 12 (↑ 13 %)	3 ± 2
	1:12	47	81	23 ± 4	31 ± 9	3 ± 1
	1:15	40	77	21 ± 5	29 ± 8	4 ± 1
Consortium of <i>Chlorella</i> sp. isolated from the environment	1:9	37	91	27 ± 4 (↑ 13 %)	33 ± 7	4 ± 2
	1:12	20	80	25 ± 6	32 ± 8	4 ± 3
	1:15	12	91	22 ± 8	24 ± 8	3 ± 3

Source: compiled by A.S. Solovyova, E.I. Noskova, A.V. Belykh.

Следует отметить, что показатели проростков рапса в контрольной пробе с дистиллированной водой (то есть без добавления микроводорослей) по ряду параметров оказались выше, особенно по энергии прорастания (61 %) и всхожести (91 %), по сравнению с большинством опытных вариантов. Возможные причины этого следующие.

1. Стрессовые факторы, возникающие вследствие высокой концентрации биоудобрений.

При введении концентрированной биомассы водорослевых культур в субстрат создаются стрессовые условия для зародышей растения, вызванные:

- присутствием физиологически активных метаболитов, продуцируемых микроводорослями в значительных количествах, таких как органические кислоты и спирты, способных при высоких концентрациях подавлять развитие корневой системы и побегов;

- нарушением ионного баланса, связанным с накоплением солей и изменением уровня pH среды;

- избыточностью содержания фитогормонов и микроэлементов, оказывающих отрицательное влияние на скорость деления клеток и длину корней;

- образованием бескислородных зон в непосредственной близости от семян вследствие активного распада органического вещества.

2. Потеря эффективности при чрезмерном разведении биоудобрения и побочные эффекты раствора.

Разведение биомассы микроводорослей до соотношений 1:12–1:15 приводит к существенному снижению концентрации веществ, стимулирующих прорастание семян, таких как ауксины, цитокинины, аминокислоты, витамины и микроэлементы. В результате положительный эффект биоудобрения практически полностью исчезает. Вместе с тем в растворе биоудобрений присутствуют соли, являющиеся основой питательной среды для микроводорослей, которые способны изменять осмотические условия при проращивании семян и оказывать побочное ингибирующее действие.

Таким образом, контроль с дистиллированной водой обеспечивает более стабильные и предсказуемые условия для прорастания семян, тогда как удобрения из микроводорослей требуют точного подбора концентрации — иначе возможно стрессовое или токсическое воздействие.

Для биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp., показавшей наилучшие результаты в представленном эксперименте, был определен элементный состав (рис. 2), в результате которого установлены преобладающие химические элементы (в сухой биомассе):

O: 53,1–54,9 %;

C: 9,1–27,1 %;

Mg: 8–17,8 %;

P: 9–17 %;

K: 0,1–1,7 %;

S, Ca, Fe: 0–0,6 %;

Si, Al: 0–0,2 %.

На рис. 3 представлены результаты расшифровки рентгенограммы образца биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp.

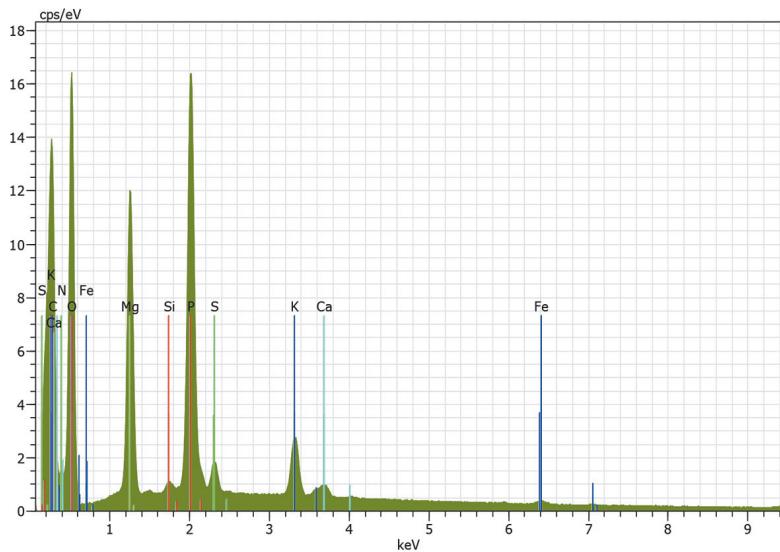


Рис. 2. Рентгеноспектральный микроанализ биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp.

Источник: составлено Е.С. Белик.

Figure 2. X-RAY microanalysis of biofertiliser from pure culture of *Chlorella* sp.

Source: compiled by E.S. Belik.

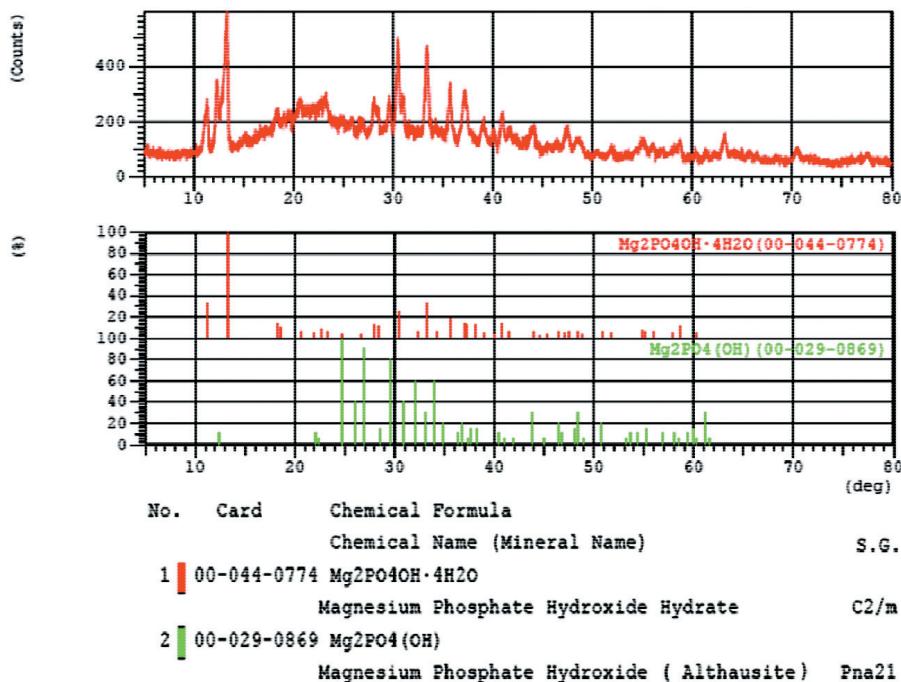


Рис. 3. Результаты расшифровки рентгенограммы образца биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp.

Источник: составлено Е.С. Белик.

Figure 3. Results of X-RAY decoding of biofertiliser sample from pure culture of *Chlorella* sp.

Source: compiled by the E.S. Belik.

Пики на дифрактограмме характеризуют следующие фазы: $Mg_2PO_4OH \cdot 4H_2O$ (пространственная группа C2/m) и Mg_2PO_4OH (структура минерала «Althausite», пространственная группа Pna21). Других кристаллических фаз в образце не идентифицировано, или их содержание меньше чувствительности дифрактометра (порядка 2–3 мас.%).

Полученные данные элементного состава образцов микроводорослей чистой культуры *Chlorella sp.*, выращенной в присутствии дымового газа, свидетельствуют о том, что биоудобрение на ее основе содержит микроэлементы, необходимые для почвы, и может быть использовано в агротехнике.

Заключение

Проведенное исследование показало, что использование биомассы микроводорослей на основе *Chlorella sp.*, как в чистом виде, так и в консорциуме с другими микроводорослями, выращенной в среде, обогащенной дымовыми газами, в качестве удобрения для проращивания семян рапса, является эффективным.

Экспериментальное исследование двух видов биоудобрений на основе *Chlorella sp.* с начальной оптической плотностью раствора 1,3–1,5 ед. и сухим весом биомассы 2,4–2,8 г/дм³ подтвердило положительное воздействие широкого диапазона разбавлений суспензий микроводорослей на прирост длины и массы надземной части растений. Наибольший зафиксированный прирост длины трехдневных проростков составил 3 мм (13%) при применении обеих культур в разведении 1:9, а наибольший прирост массы трехдневных проростков — 10 мг (13 %) при использовании чистой культуры *Chlorella sp.* в разведении 1:9. Увеличение энергии прорастания и процента всхожести семян было отмечено при внесении биомассы чистой культуры *Chlorella sp.* в разбавлении 1:9 (на 6 %).

Элементный анализ сухой биомассы, входящей в состав биоудобрения из чистой культуры *Chlorella sp.*, выявил повышенную концентрацию магния и фосфора.

Таким образом, для повышения витальных и морфофизиологических показателей семян рапса можно рекомендовать использовать чистую культуру *Chlorella sp.*, выведенную из препарата микроводорослей торговой марки «Spirulinafood», с дозировкой внесения 1 л биоудобрения с содержанием биомассы 2,4–2,8 г/дм³ и оптической плотностью 1,3–1,5 ед. на 9 л воды.

Следует отметить, что при подборе концентрации биоудобрения из микроводорослей для проращивания семян важно учитывать риск неблагоприятного влияния повышенного содержания активных компонентов в биомассе на сами семена и их проростки.

Список литературы

- [1] Земсков А.А., Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю. Современные тенденции в развитии калийной промышленности в мире // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 3. С. 369–382. EDN: MCQCTN

- [2] Бузетти К.Д., Иванов М.В. Воздействие минеральных и органических удобрений на экосистему, качество сельскохозяйственной продукции и здоровье человека // Аграрная наука. 2020. № 5. С. 80–84. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-338-5-80-84> EDN: DQLGFZ
- [3] Конова А.М., Гаврилова А.Ю. Действие и последействие длительного внесения минеральных удобрений на продуктивность севооборота и агрохимические показатели почвы // Плодородие. 2021. № 4 (121). С. 10–13. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.03> EDN: LXHHIG
- [4] Игумнова О. В. Экологический анализ жизненного цикла фосфорных минеральных удобрений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2005. № 1. С. 27–33. EDN: JWPFTT
- [5] Адарченко И., Курбатова А., Поротникова Н., Савенкова Е., Кумар В., Скорогодова Ю. Передовые технологии для биоэкономики: кейс продукции из микроводорослей // Форсайт и управление НТИ. 2024. Т. 18, № 2. С. 69–83. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2024.2.69.83> EDN: YORTXJ
- [6] Parveen A., Rawat J., Bhatnagar P., Gautam P., Kumar S., Upadhyay S., Vlaskin M.S., Kurbatova A.I., Kumar V., Nanda M. Enhanced production of high-value compounds from *Chlorella sorokiniana* by two-stage cultivation under red light and salinity stress // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2024. Vol. 60. Article no. 103315. ISSN 1878-8181. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103315> EDN: ANQQFC
- [7] Шалыго Н. Микроводоросли и цианобактерии как биоудобрение // Наука и инновации. 2019. № 3 (193). С. 10–12. EDN: ZDGLID
- [8] Стифеев А. И. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе. Курск : Курская государственная сельскохозяйственная академия, 2014. 181 с. EDN: TMAUZX
- [9] Лукьянов В.А., Стифеев А.И., Горбунова С.Ю. Микроводоросль *Chlorella vulgaris Beijer* — высокопродуктивный штамм для сельского хозяйства // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2015. Т. 13. С. 1576–1580. EDN: TWCJHF
- [10] Музрафов А.М., Таубаев Т.Т., Джуманиязов И.Д. Альголизация орошаемых земель протококковыми водорослями и ее влияние на биологическую активность почв и урожайность сельскохозяйственных культур. Ташкент : Фан, 1978. 15 с. (Информационное сообщение).
- [11] Патент 2797838 RU. Способ утилизации углекислого газа с применением микроводоросли рода *Chlorella* : опубл. 08.06.2023. / Н.А. Политаева, В.В. Жажков, Н.В. Зибарев, К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич. Бюл. № 16. EDN: OMIVZY
- [12] Глазунова Д.М., Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю. Секвестрация углерода атмосферы с использованием микроводорослей // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2024. Т. 166. № 1. С. 82–125. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.82-125> EDN: BEWUAK
- [13] Власкин М.С., Киселева С.В., Чернова Н.И., Григоренко А.В., Рындин К.Г., Попель О.С., Маланий С.Я., Славкина О.В., Навес Ф. де Фариас, Кумар В. Эффективность поглощения CO₂ микроводорослями *Arthrospira platensis* из смеси, моделирующей дымовые газы // Теплоэнергетика. 2023. № 5. С. 57–72. EDN: GQAGVR
- [14] 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. EDN: LLCHNK

References

- [1] Zemskov AA, Maksimovich NG, Meshcheriakova OYu. Modern trends in the development of potassium industry in the world. *Izvestija Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o zemle.* 2022;3:369–382. (In Russ.) EDN: MCQCTN
- [2] Buzetti KD, Ivanov MV. The impact of mineral and organic fertilizers on the ecosystem, the quality of agricultural products and human health. *Agrarian Science.* 2020;(5):80–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-338-5-80-84> EDN: DQLGFZ
- [3] Konova AM, Gavrilova AYu. Effect and aftereffect of long-term application of increasing doses of mineral fertilizers on crop rotation productivity and agrochemical indicators of sod-podzolic light loamy soil. *Plodorodie.* 2021;(4):10–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.03> EDN: LXHHIG
- [4] Igumnova OV. Life cycle analysis of the phosphoric fertilizer industry. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety.* 2005;1:27–33. (In Russ.) EDN: JWPFTT
- [5] Adarchenko I, Kurbatova A, Porotnikova N, Savenkova E, Kumar V, Skorokhodova Y. Advanced technologies for bioeconomy: the case of microalgae production. *Foresight and STI Governance.* 2024;18(2):69–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2024.2.69.83> EDN: YORTXJ
- [6] Parveen A, Rawat J, Bhatnagar P, Gautam P, Kumar S, Upadhyay S, Vlaskin MS, Kurbatova AI, Kumar V, Nanda M. Enhanced production of high-value compounds from *Chlorella sorokiniana* by two-stage cultivation under red light and salinity stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology;* 2024;60:103315. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103315> EDN: ANQQFC
- [7] Shalyha M. Microalgae and cyanobacteria as a bio-fertilizer. *Nauka i innovacii.* 2019;3:10–12. (In Russ.) EDN: ZDGLID
- [8] Stifeev AI. *Applied aspects of microalgae application in agrocenosis.* Kursk: Kurskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya; 2014. (In Russ.) EDN: TMAUZX
- [9] Luk'yanov VA, Stifeev AI, Gorbunova SYu. The microalga *Chlorella vulgaris Beijer* is a highly productive strain for agriculture. *Nauchno-Metodicheskij Elektronnyj Zhurnal «Koncept».* 2015;13:1576–1580. (In Russ.). EDN: TWCJHF
- [10] Muzaferov AM, Taubaev TT, Dzhumaniyazov I. *Algolization of irrigated lands by proto-coccal algae and its effect on the biological activity of soils and crop yields.* Tashkent: Fan Publ.; 1978. 15 p. (Informational report). (In Russ.)
- [11] Politueva NA, Zhazhkov VV, Zibarev NV, Vel'mozhina KA, Shinkevich PS. Patent 2797838 RU. *Method for utilization of carbon dioxide using microalgae Chlorella.* Publ. 08/06/2023. Bul. No. 16. EDN: OMIVZY
- [12] Glazunova DM, Galitskaya PYu, Selivanovskaya SYu. Atmospheric carbon sequestration using microalgae. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki.* 2024;166(1):82–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.82-125> EDN: BEWUAK
- [13] Vlaskin MS, Kiseleva SV, Chernova NI, Grigorenko AV, Ryndin KG, Popel OS, Malanii SYa, Slavkin OV, Naves F. de Farias, Kumar V. Effectiveness of CO₂ Capture by *Arthrospira platensis* Microalgae from a Mixture Simulating Flue Gases. *Teploenergetika.* 2023;(5):57–72. EDN: GQAGVR (In Russ.)
- [14] Belik ES., Solovyova AS, Maktieva SM., Rudakova LV. Evaluation of the biofixation efficiency of different microalgae cultures. *BIOAsia Altai 2024: Proceedings of the IV International Biotechnology Forum, Barnaul, September 23–28, 2024.* Barnaul: Altai State University, 2024:381–384 (in Russ.). EDN: LLCHNK

Сведения об авторах:

Соловьева Алена Сергеевна, аспирант кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0000-0002-6017-1579, eLIBRARY SPIN-код: 2997-1455; AuthorID: 700802. E-mail: alyona.solvyova@mail.ru

Белик Екатерина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0000-0002-1961-0234; eLIBRARY SPIN-код: 3494-6492; AuthorID: 638148. E-mail: zhdanova-08@mail.ru

Рудакова Лариса Васильевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0000-0003-3292-8359; eLIBRARY SPIN-код: 1705-6430; AuthorID: 423174. E-mail: larisa@eco.pstu.ac.ru

Носкова Елизавета Ивановна, студент кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0009-0008-5341-9872. E-mail: nokliza617@gmail.com

Белых Анастасия Владимировна, студент кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0009-0003-1867-621X. E-mail: beykh941@gmail.com

Bio notes:

Alyona S. Solovyova, PhD student, Perm National Research Polytechnic University, 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6017-1579, eLIBRARY SPIN-код: 2997-1455; AuthorID: 700802. E-mail: alyona.solvyova@mail.ru

Ekaterina S. Belik, C. Tech. Sc., Docent, Perm National Research Polytechnic University, 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1961-0234; eLIBRARY SPIN-код: 3494-6492; AuthorID: 638148. E-mail: zhdanova-08@mail.ru

Larisa V. Rudakova, Dr. Tech. Sc., Professor, Perm National Research Polytechnic University, 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-3292-8359; eLIBRARY SPIN-код: 1705-6430; AuthorID: 423174. E-mail: larisa@eco.pstu.ac.ru

Elizaveta I. Noskova, student, Perm National Research Polytechnic University. 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-5341-9872. E-mail: nokliza617@gmail.com

Anastasiya V. Belykh, student, Perm National Research Polytechnic University. 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0009-0003-1867-621X. E-mail: beykh941@gmail.com