

УДК 620.951

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-401-12-171-178

К.А. Вельможина

П.С. Шинкевич

Н.А. Политаева

А.Н. Чусов

В.И. Масликов

А.М. Опарина

Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого, Санкт-Петербург, Россия

anizhomlev@mail.ru

Поступила в редакцию: 07.08.2025

Одобрена после рецензирования: 13.11.2025

Принята к публикации: 28.11.2025

© Вельможина К.А., Шинкевич П.С.,
Политаева Н.А., Чусов А.Н.,
Масликов В.И., Опарина А.М.

Влияние добавки из микроводорослей после культивирования в условиях повышенного содержания CO₂ на процесс анаэробного сбраживания органосодержащих отходов

РЕЗЮМЕ

В статье представлены результаты экспериментального изучения процесса анаэробного сбраживания биомассы микроводорослей *Chlorella kessleri*, предварительно культивированной при повышенных концентрациях CO₂, с добавлением пищевых отходов и коровьего навоза в качестве инокулянта.

Цель работы — определение оптимального соотношения компонентов смеси для сбраживания (микроводоросли — пищевые отходы — инокулянт) по органическому углероду для максимального выхода биогаза и его энергетического потенциала (по содержанию метана в биогазе).

Установлено, что наилучшие результаты (1,018 л биогаза и 67,3% метана) достигаются при соотношении 1,0 г — 3,2 г — 4,0 г, тогда как максимальная доля метана (67,8%) зафиксирована при добавлении 1,2 г микроводорослей.

Полученные данные позволяют рекомендовать использование добавки из биомассы микроводорослей *Chlorella kessleri*, предварительно культивированной при повышенных концентрациях CO₂, для совместного анаэробного сбраживания с пищевыми отходами и инокулянтом в качестве энергоэффективного, экологичного и экономически целесообразного метода повышения биогазового потенциала композиционной смеси для сбраживания.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, биогаз, метан, микроводоросли, пищевые отходы, углекислый газ

Для цитирования: Вельможина К.А., Шинкевич П.С., Политаева Н.А., Чусов А.Н., Масликов В.И., Опарина А.М. Влияние добавки из микроводорослей после культивирования в условиях повышенного содержания CO₂ на процесс анаэробного сбраживания органосодержащих отходов. *Аграрная наука*. 2025; 401(12): 171–178.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-401-12-171-178>

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-401-12-171-178

Ksenia A. Velmozhina

Polina S. Shinkevich

Natalia A. Politaeva

Alexander N. Chusov

Vladimir I. Maslikov

Anna M. Oparina

Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University, St. Petersburg,
Russia

anizhomlev@mail.ru

Received by the editorial office: 07.08.2025

Accepted in revised: 13.11.2025

Accepted for publication: 28.11.2025

© Velmozhina K.A., Shinkevich P.S.,
Politaeva N.A., Chusov A.N., Maslikov V.I.,
Oparina A.M.

Effect of microalgae biomass cultivated under elevated CO₂ concentrations on the process of anaerobic digestion of organo-containing waste

ABSTRACT

This article presents the results of an experimental study on the anaerobic digestion of *Chlorella kessleri* microalgae biomass, preliminarily cultivated under elevated CO₂ concentrations. The digestion process was carried out with the addition of food waste and cow manure as an inoculum.

The aim of the work is to determine the optimal ratio of the components of the fermentation mixture (microalgae — food waste — inoculant) for organic carbon for maximum biogas yield and its energy potential (in terms of methane content in biogas).

It was found that the best results (1,018 liters of biogas and 67.3% methane) were achieved with a ratio of 1.0 g — 3.2 g — 4.0 g, while the maximum proportion of methane (67.8%) was recorded with the addition of 1.2 g of microalgae.

The obtained results support the recommendation to use *Chlorella kessleri* biomass, previously cultivated under elevated CO₂ conditions, as an additive in co-anaerobic digestion with food waste and inoculum. This approach is proposed as an energy-efficient, environmentally friendly, and economically viable method to enhance the biogas potential of feedstock mixtures.

Key words: anaerobic digestion, biogas, methane, microalgae, food waste, carbon dioxide

For citation: Velmozhina K.A., Shinkevich P.S., Politaeva N.A., Chusov A.N., Maslikov V.I., Oparina A.M. Effect of microalgae supplementation after cultivation under conditions of elevated CO₂ content on the process of anaerobic digestion of organo-containing waste. *Agrarian science*. 2025; 401(12): 171–178 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-401-12-171-178>

Введение/Introduction

Рост концентрации углекислого газа (CO_2) в атмосфере и его накопление в закрытых помещениях вызывают серьезную обеспокоенность как в контексте глобального изменения климата, так и с точки зрения здоровья и комфорта человека [1–3]. В настоящее время наиболее востребованными и экологичными являются биологические методы улавливания CO_2 , принцип действия которых основан на фотосинтетической активности микроорганизмов [4]. В частности, особое внимание уделяется микроводорослям благодаря их способности к эффективному преобразованию углекислого газа в биомассу, что наиболее актуально в контексте достижения целей устойчивого развития. В отличие от химических методов, биологические методы улавливания CO_2 не образуют токсичных отходов и могут быть интегрированы в процесс производства биоэнергии [5–7].

Биомасса микроводорослей, культивируемая в условиях повышенного содержания CO_2 , может быть использована в дальнейших технологических процессах, что создает условия для реализации безотходной технологии улавливания углекислого газа.

В связи с тем что вектор развития энергетического сектора мировой экономики направлен в сторону разработки альтернативных методов получения энергии из возобновляемых источников, наиболее целесообразным и актуальным является преобразование полученной биомассы микроводорослей в энергетический ресурс. Биомасса микроводорослей может являться ценным сырьем для получения биодизеля 3-го поколения [8], биоводорода [9] и биогаза.

Технологии получения биогаза при анаэробном сбраживании органических отходов зарекомендовали себя как экономически прибыльные и энергоэффективные процессы, реализуемые в различных странах. Биогазовые установки успешно внедряются как в развитых, так и в развивающихся странах, поддерживая концепцию циркулярной экономики и устойчивого развития [10–12].

Внедрение новых субстратов, оптимизация процессов и интеграция с другими видами производства энергии позволяют расширять масштабы применения биогазовых технологий и повышать их рентабельность [13, 14]. При анаэробном сбраживании органических отходов с использованием добавки из биомассы микроводорослей наблюдается заметное повышение как общего объема, так и энергетической ценности биогаза¹. В данном случае микроводоросли являются источником легкоусвояемых углеродных соединений (липидов и углеводов), в связи с чем биомасса может рассматриваться в качестве биологически активной добавки для стимулирования активности метаногенных бактерий. Однако остается актуальным

вопрос установления наиболее эффективного соотношения композиционной смеси при использовании добавок из биомассы микроводорослей.

Применение микроводорослей в контексте альтернативной энергетики требует точного подбора оптимального соотношения компонентов смеси с учетом их влажности и содержания органического углерода для максимизации выхода и качества продукта.

В исследовании M. Dębowksi и др. (2020) было установлено, что использование добавки из биомассы микроводорослей в композиционной смеси для сбраживания приводит к систематическому увеличению выхода биогаза и содержанию метана в нем [15]. При этом отмечено, что при увеличении доли добавки из микроводорослей в композиционной смеси выше 40% эффективность не повышается.

Эффективность использования добавки из биомассы микроводорослей для увеличения биогазового потенциала при анаэробном сбраживании обсуждалась во многих научных исследованиях [16–19], однако количество научных исследований, направленных на изучение свойств биомассы микроводорослей после поглощения CO_2 в контексте анаэробного сбраживания, оказалось значительно ниже [20, 21]. При этом биомасса, полученная при культивировании с CO_2 , содержит высокий процент белка (до 46% сухого веса), что делает ее ценной добавкой для анаэробного сбраживания [21].

Цель работы — изучение процесса анаэробного сбраживания биомассы микроводорослей, культивирование которой проходило в условиях повышенного содержания CO_2 , органических (пищевых) отходов и инокулянта.

Для достижения поставленной цели были сформулированы задачи по определению оптимальных соотношений компонентов композиционной смеси (по органическому углероду), обеспечивающих: 1) максимальное количество метана в биогазе; 2) максимальное количество биогаза; 3) получение продукта с наибольшей энергетической ценностью.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Эксперимент проводили на базе центра коллективного пользования «Аналитический центр нано- и биотехнологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого» в 2025 г.

В качестве компонентов композиционных смесей для анаэробного сбраживания были использованы: 1) биомасса микроводорослей *Chlorella kessleri*; 2) пищевые отходы; 3) инокулянт.

Культивирование биомассы микроводорослей *Chlorella kessleri* проходило в условиях повышенного содержания CO_2 . Методика культивирования

¹ Политаева Н.А., Масликов В.И., Чусов А.Н. и др. Способ увеличения биогазового потенциала органосодержащих отходов 2826145 С1, С02F 11/04, С02F 3/32, С12N 1/12. 2024.

и одновременного поглощения углекислого газа микроводорослей описана в ранее опубликованных работах авторского коллектива² [22]. Перед непосредственным использованием микроводорослей в процессе анаэробного сбраживания полученная биомасса была отцентрифужирована на 12-литровой центрифуге с охлаждением Thermo Scientific Sorvall RC12BP Plus (США). Суспензия микроводорослей центрифугировалась в течение 10 минут при 5000 об/мин. Для дальнейшего обезвоживания биомассы микроводорослей использовали лиофильную сушку AK5-5ON (Proflab, Россия) при давлении в камере 0,5 бар. Обезвоживание осуществлялось в течение 48 часов.

В качестве катализатора процесса анаэробного сбраживания использовали инокулянт — свежий коровий навоз, отбираемый на молочно-товарной ферме, содержание животных на которой соответствует санитарно-ветеринарным требованиям³.

Состав смеси пищевых отходов принимался по данным исследований НПО «Ордена трудового красного знамени Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова» (Россия) (табл. 1).

Расчет фактического веса закладываемых в биореактор компонентов был проведен по содержанию органического углерода и влажности каждого компонента отдельно. Влажность (W, %) определяли с помощью анализатора влажности MB35, OHAUS Europe (Швейцария) при температуре процесса 105 °С. Сушку проводили автоматически до постоянного значения массы образца.

Массовую долю золы в компоненте определяли путем взвешивания компонента до и после прокаливания в муфельной печи BR-12N-1 (Brother Furnace, Китай). Прокаливание проводили при температуре 550 °С в течение 120 мин. Массовую долю золы (D, %) в компонентах композиционных смесей определяли по формуле 1:

$$D = \frac{x_1 \times 100}{x}, \quad (1)$$

где: x — начальная масса компонента перед прокаливанием, г; x₁ — масса компонента после прокаливания, г.

Результаты определения влажности и зольности для каждого из компонентов загружаемой смеси представлены в таблице 2.

Общее содержание органического углерода в композиционной смеси на один биореактор объемом 1 л было определено в диапазоне от 8,0 г / орг. угл. до 8,6 г / орг. угл. Всего были исследованы 4 соотношения компонентов композиционной смеси. Каждое соотношение компонентов композиционной смеси исследовали в двух параллельных повторностях (n = 2). Всего задействованы 8 биореакторов.

Таблица 1. Состав смеси пищевых отходов для анаэробного сбраживания на 1 кг

Table 1. Composition of the food waste mixture for anaerobic digestion per 1 kg

Состав	Состав смеси пищевых отходов для анаэробного сбраживания на 1 кг	
	%	г
Картофель и его очистки	40,0	400,0
Другие овощи	30,0	300,0
Фрукты	20,0	200,0
Мясо и мясные изделия	3,0	30,0
Кости животного происхождения	3,0	30,0
Рыба, рыбные кости	1,5	15,0
Хлеб и хлебопродукты	0,5	5,0
Молочные продукты	1,0	10,0
Яичная скорлупа	0,5	5,0
Прочие отходы, упаковка	0,5	5,0

Таблица 2. Параметры для расчета веса закладываемых в биореактор компонентов

Table 2. Parameters for calculating the weight of components loaded into the bioreactor

Параметр	Микроводоросли	Пищевые отходы	Инокулянт
x, г	1,009	3,385	0,973
x ₁ , г	0,065	0,227	0,081
W, %	5,050	82,67	78,11
D, %	6,44	6,71	8,32

По формуле (2) был рассчитан фактический вес (у, г) закладываемых в биореактор компонентов:

$$Z = \frac{x_2}{(100-D) \times (100-W)} \times 10000, \quad (2)$$

где x₂ — требуемое содержание органического углерода в компоненте, г.

Закладку компонентов композиционной смеси осуществляли во влажном состоянии согласно результатам, определенным в таблице 2 и рассчитанным по формуле (2) (табл. 3).

Таблица 3. Содержание композиционных смесей в биореакторах

Table 3. Contents of the composite mixtures in bioreactors

№ биореактора	Микроводоросли		Пищевые отходы		Инокулянт		Общее содержание орг. угл., г
	z, г	x ₂ , г / орг. угл.	z, г	x ₂ , г / орг. угл.	z, г	x ₂ , г / орг. угл.	
1	0,90	0,80	19,79	3,20	19,93	4,00	8,00
2	0,90	0,80	19,79	3,20	19,93	4,00	8,00
3	1,13	1,00	19,79	3,20	19,93	4,00	8,20
4	1,13	1,00	19,79	3,20	19,93	4,00	8,20
5	1,35	1,20	19,79	3,20	19,93	4,00	8,40
6	1,35	1,20	19,79	3,20	19,93	4,00	8,40
7	1,58	1,40	19,79	3,20	19,93	4,00	8,60
8	1,58	1,40	19,79	3,20	19,93	4,00	8,60

²Политаева Н.А., Жажков В.В., Зибарев Н.В. и др. Способ утилизации углекислого газа с применением микроводоросли рода Chlorella, 2797838 С1, B01D 53/62, B01D 53/84. 2022.

³ Ветеринарно-санитарные правила подготовки к использованию в качестве органических удобрений навоза, помета и стоков при инфекционных и инвазионных болезнях животных и птицы (утв. Минсельхозпродом РФ 04.08.1997 № 13-7-2/1027).

Для установления наиболее эффективного процентного соотношения добавляемой биомассы микроводорослей к сбраживаемым пищевым отходам и инокулянту масса последних в каждом из биореакторов была оставлена неизменной, тогда как загружаемая масса микроводорослей варьировалась в диапазоне от 0,90 до 1,58 г.

После загрузки композиционной смеси в каждый биореактор были добавлены 600 мл отфильтрованной воды для равномерного распределения субстрата и поддержания анаэробных условий в начале эксперимента.

Исследования проводили с использованием экспериментальной установки (УНУ) «Лабораторный комплекс для исследования процессов получения и преобразования биогазов из органосодержащих отходов». Более подробно схема УНУ и методика работы на ней описаны в предыдущих работах авторского коллектива [23].

Для проведения эксперимента использовали оборудование Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия), а также методики организации проведения экспериментов с органическими отходами и анализа полученных результатов [24].

Экспериментальное изучение процесса анаэробного сбраживания биомассы микроводорослей после их культивирования с дополнительной подачей углекислого газа проводили в мезофильных условиях (при $T = +35^{\circ}\text{C}$). Длительность эксперимента составила 70 суток.

Измерение компонентного состава биогаза непосредственно в биореакторах производили с использованием портативного газоанализатора GA2000 (Geotechnical Instruments Ltd., Великобритания).

Все измерения проводили в трехкратных повторностях. Статистический анализ проводили линейной смешанной моделью для повторных измерений ($\alpha = 0,05$). Математическую обработку данных, полученных в ходе исследований, проводили с помощью программы Microsoft Excel (США).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Динамика образования метана в накопленном биогазе в каждом из биореакторов представлена на рисунке 1.

Согласно полученным результатам, максимальное содержание метана (67,8%) было зафиксировано в биореакторе № 6 со следующей композиционной загрузкой (по органическому углероду): 1,2 г микроводорослей + 3,2 г пищевых отходов + 4,0 г инокулянта.

Высокое процентное содержание метана в биогазе наблюдалось в биореакторах № 4, 5 и 7 (67,3%, 63%, 65,1% соответственно).

Наименее эффективной смесью для получения биогаза с высоким содержанием метана оказалась композиционная загрузка в первом биореакторе: 0,8 г микроводорослей + 3,2 г пищевых отходов + 4,0 г инокулянта. Полученные значения свидетельствуют о прямой зависимости энергетической емкости биогаза, определяемой общим содержанием метана в нем, от количества биомассы микроводорослей в композиционной смеси.

Можно заметить, что наибольшее количество метана по всем биореакторам было зафиксировано на 6–7-ю неделю от начала компостирования, соответствует максимуму метаногенной фазы в классической схеме анаэробного разложения.

Результаты замеров биогазового потенциала каждого биореактора, полученные с программного обеспечения Rigamo, представлены в таблице 4.

Таким образом, динамика накопления биогаза в каждом биореакторе представлена на рисунке 2.

На представленном графике видно, что наибольшее количество биогаза (1,018 л) образовалось сразу в двух биореакторах — № 1 и № 4, однако, учитывая высокую энергетическую емкость биогаза в реакторе № 4, наиболее эффективной

Рис. 1. Динамика образования метана в накопленном биогазе в каждом биореакторе

Fig. 1. Dynamics of methane formation in the accumulated biogas in each bioreactor

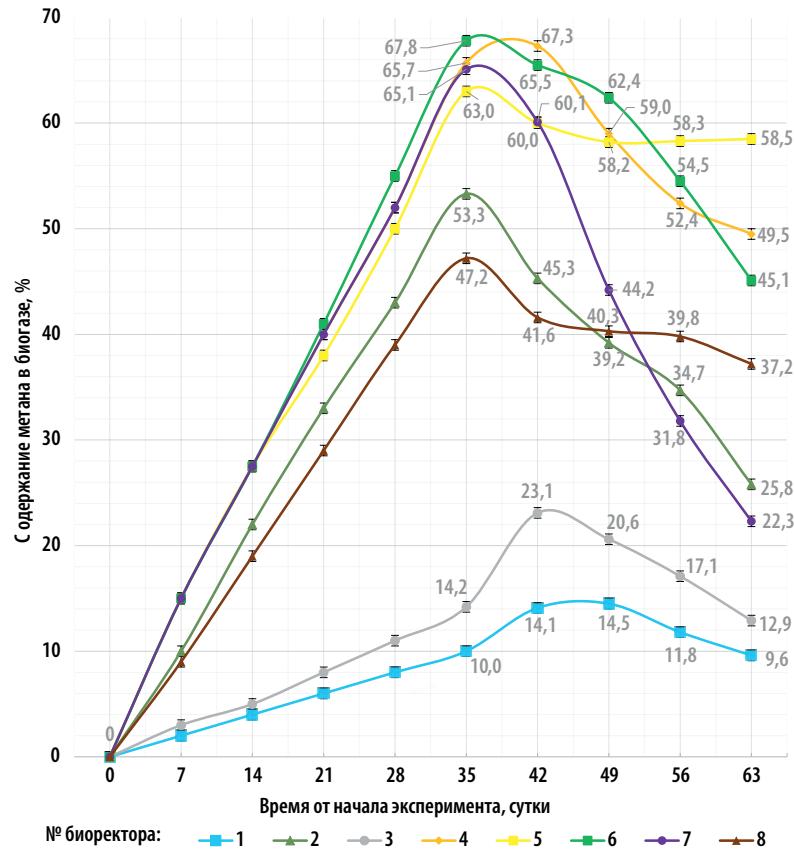


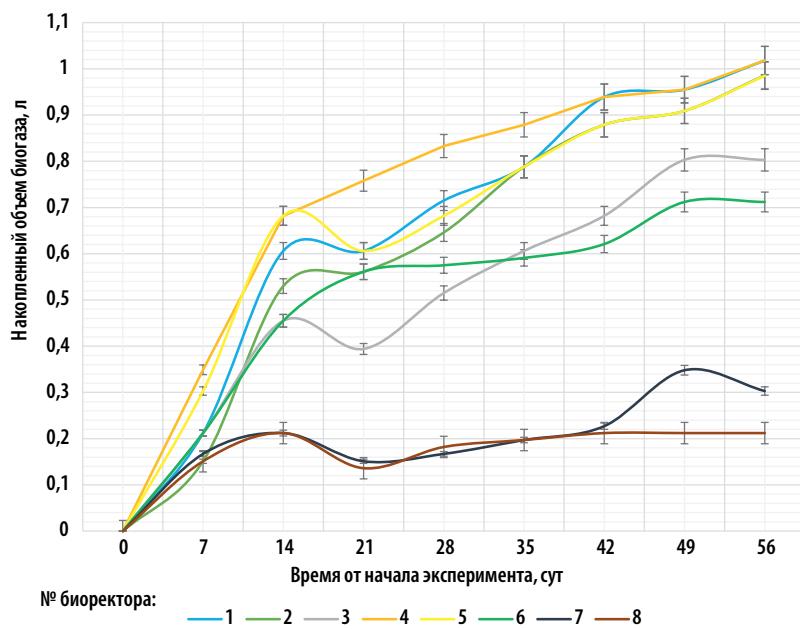
Таблица 4. Количество образовавшегося биогаза в биореакторах

Table 4. Amount of biogas produced in the bioreactors

№ биореактора	Количество выделившегося биогаза, л							
	время от начала эксперимента, сут.							
	7	14	21	28	35	42	49	56
1	0,212	0,606	0,606	0,715	0,788	0,939	0,955	1,018
2	0,151	0,53	0,561	0,646	0,788	0,879	0,909	0,986
3	0,212	0,455	0,394	0,515	0,606	0,682	0,803	0,803
4	0,349	0,682	0,758	0,833	0,879	0,939	0,955	1,018
5	0,303	0,682	0,606	0,682	0,788	0,879	0,909	0,985
6	0,212	0,455	0,561	0,575	0,591	0,621	0,712	0,712
7	0,167	0,212	0,151	0,167	0,197	0,227	0,348	0,303
8	0,151	0,212	0,136	0,182	0,197	0,212	0,212	0,212

Рис. 2. Динамика накопления биогаза в каждом биореакторе

Fig. 2. Dynamics of biogas accumulation in each bioreactor



композиционной смесью будет являться следующая смесь: 1,0 г микроводорослей + 3,2 г пищевых отходов + 4,0 г инокулянта (по органическому углероду). Высокий потенциал образования биогаза был зафиксирован в биореакторах № 2 (0,986 л), № 5 (0,985 л) и № 6 (0,712 л).

Полученные результаты подтверждают гипотезу о корреляции между долями микроводорослей *Chlorella kessleri* в композиционной смеси для сбраживания и содержанием метана в биогазе при анаэробном сбраживании. Высокое содержание метана (до 67,8%) в биореакторе № 6, в композиционную смесь которого были добавлены 1,20 г / орг. угл. биомассы *Chlorella kessleri*, подтверждает данные ряда исследований о стимулировании метаногенных микробных сообществ и улучшении гидролиза субстрата при использовании добавки из микроводорослей [19, 25].

При этом минимальное содержание метана (14,5%) в биореакторе № 1 (с добавлением 0,80 г / орг. угл. биомассы *Chlorella kessleri*) может указывать на дисбаланс С/Н-, что приводит к снижению метаногенной активности бактерий и уменьшению доли метана в выделяемом биогазе [16, 26]. Стабильно высокое содержание метана (63–67%) в биореакторах № 4, 5 и 7 подтверждает роль биомассы микроводорослей как «энергетического активатора» процесса анаэробного сбраживания органосодержащих отходов [18, 27].

Интересным является различие между объемом и качеством биогаза, что доказывает тезис о том, что максимальный объем биогаза не всегда совпадает с максимальным содержанием метана. Так, максимальный объем (1,018 л) был зафиксирован в биореакторах № 1 и 4, однако только в биореакторе № 4 обеспечивалось оптимальное

соотношение объема биогаза и высокой доли метана в нем. Таким образом, для комплексного улучшения процесса анаэробного сбраживания органосодержащих отходов необходимо учитывать не только объем биогаза, но и его энергетическую емкость, определяемую количеством метана в нем [28].

Наблюдаемый пик метанообразования на 6–7-й неделе полностью соответствует классической динамике анаэробного разложения, включающей последовательные стадии гидролиза, ацетогенеза и метаногенеза. Согласно данным из литературных источников, на этой стадии численность и активность метаногенных архей достигают максимума, что и подтверждается результатами данного эксперимента [29, 30].

Таким образом, использование микроводорослей, культивирование которых проходило в условиях повышенного содержания CO₂, позволяет одновременно утилизировать углекислый газ и получать высокоэнергетический биогаз, что делает технологию перспективной в рамках реализации экономики замкнутого цикла [31–33]. Такой подход может рассматриваться как перспективное направление развития технологий устойчивого обращения с органическими отходами и биотехнологической утилизации CO₂.

Выводы/Conclusions

Исследование показало, что совместное анаэробное сбраживание биомассы *Chlorella kessleri*, культивирование которой проходило в условиях повышенного содержания CO₂, с пищевыми отходами и инокулянтом обладает значительным

потенциалом для повышения энергетической ценности получаемого биогаза. Установлено, что внесение биомассы микроводорослей в композиционную смесь для анаэробного сбраживания обеспечивает оптимальный углеродно-азотный баланс и активирует метаногенные бактерии, что отражается в увеличении доли метана до 67,8% и стабилизации процесса газообразования. Подобные показатели соответствуют уровню промышленно применимых технологий биогазовой энергетики.

Установлено, что композиционная смесь с содержанием 12% микроводорослей, 39% органосодержащих отходов и 49% инокулянта является наиболее эффективной как с точки зрения общего выхода биогаза, так и его энергетической емкости (по метану). Подобная пропорция обеспечивает устойчивое функционирование метаногенной фазы и повышает удельный выход метана без необходимости увеличения времени выдержки или применения энергоемких методов предобработки.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за plagiat. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение от 12.04.2024 № 24-17-20004).
<https://rscf.ru/project/24-17-20004/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jacobson T.A., Kler J.S., Hernke M.T., Braun R.K., Meyer K.C., Funk W.E. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*. 2019; 2(8): 691–701. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>
2. Azuma K., Kagi N., Yanagi U., Osawa H. Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment International*. 2018; 121(1): 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.059>
3. Шинкевич П.С., Политаева Н.А. Применение микроводорослей в ССУ-технологиях. *Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология. Международная научная конференция. Сборник докладов*. Белгород: Белгородский государственный технологический университет. 2023; 329–334. <https://www.elibrary.ru/dmxjsh>
4. Daneshvar E., Wicker R.J., Show P.-L., Bhatnagar A. Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization — A review. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 427: 130884. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130884>
5. Li S., Chang H., Zhang S., Ho S.-H. Production of sustainable biofuels from microalgae with CO₂ bio-sequestration and life cycle assessment. *Environmental Research*. 2023; 227: 115730. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115730>
6. Onyeaka H., Miri T., Obileke K., Hart A., Anumudu C., Al-Sharify Z.T. Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. *Carbon Capture Science & Technology*. 2021; 1: 100007. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100007>
7. Шинкевич П.С., Вельможина К.А., Политаева Н.А., Чусов А.Н. Роль микроводорослей в современных технологиях фиксации и утилизации углекислого газа. *Альтернативная энергетика и экология*. 2024; (10): 154–166. <https://www.elibrary.ru/cqzywb>
8. Зибарев Н.В., Политаева Н.А., Молодкина Л.М. Получение биодизеля из микроводорослей путем переэтерификации биомассы. *Бутлеровские сообщения*. 2023; 73(1): 101–108. <https://www.elibrary.ru/abpich>

Полученные результаты подтверждают высокую научно-техническую перспективность интеграции биомассы микроводорослей в схемы анаэробной переработки органосодержащих отходов. Данная стратегия является как технологически оправданной, так и экологически значимой, поскольку одновременно решает задачи утилизации CO₂ путем биологического связывания углерода микроводорослями, повышения эффективности биогазовых установок, а также снижения углеродного следа и выбросов парниковых газов.

Таким образом, предложенная схема может рассматриваться как один из наиболее перспективных элементов биотехнологий для развития низкоуглеродной энергетики и формирования циркулярной экономики, обеспечивая интеграцию процессов улавливания CO₂, биоконверсии органических субстратов и получения возобновляемого энергоносителя промышленного качества.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors made an equal contribution to the work.

The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.

The authors declare no conflict of interest.

FUNDING

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (agreement dated 04/12/2024 No. 24-17-20004).
<https://rscf.ru/project/24-17-20004/>

REFERENCES

1. Jacobson T.A., Kler J.S., Hernke M.T., Braun R.K., Meyer K.C., Funk W.E. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*. 2019; 2(8): 691–701. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>
2. Azuma K., Kagi N., Yanagi U., Osawa H. Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment International*. 2018; 121(1): 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.059>
3. Shinkevich P.S., Politaeva N.A. Application of microalgae in CCU technologies. *Rational use of natural resources and processing of technogenic raw materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry and biotechnology. International scientific conference. Collection of reports*. Belgorod: Belgorod State Technological University. 2023; 329–334 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/dmxjsh>
4. Daneshvar E., Wicker R.J., Show P.-L., Bhatnagar A. Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO₂ biofixation and biomass valorization — A review. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 427: 130884. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130884>
5. Li S., Chang H., Zhang S., Ho S.-H. Production of sustainable biofuels from microalgae with CO₂ bio-sequestration and life cycle assessment. *Environmental Research*. 2023; 227: 115730. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115730>
6. Onyeaka H., Miri T., Obileke K., Hart A., Anumudu C., Al-Sharify Z.T. Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. *Carbon Capture Science & Technology*. 2021; 1: 100007. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100007>
7. Shinkevich P.S., Velmozhina K.A., Politaeva N.A., Chusov A.N. Development of a technological scheme for carbon dioxide utilization and biohydrogen production using microalgae. *International scientific journal for Alternative energy and ecology*. 2024; (10): 154–166 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/cqzywb>
8. Zibarev N.V., Politaeva N.A., Molodkina L.M. Production of biodiesel from microalgae by transesterification of biomass. *Butlerov Communications*. 2023; 73(1): 101–108 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/abpich>

9. Velmozhina K. *et al.* Production of Biohydrogen from Microalgae Biomass after Wastewater Treatment and Air Purification from CO₂. *Processes*. 2023; 11(10): 2978. <https://doi.org/10.3390/pr11102978>
10. Kougias P.G., Angelidaki I. Biogas and its opportunities — A review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2018; 12(3): 14. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>
11. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010; 85(4): 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
12. Ngabala F.J., Emmanuel J.K. Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion—an alternative energy source. *Helion*. 2024; 10(23): e40632. <https://doi.org/10.1016/j.helion.2024.e40632>
13. Atelge M.R. *et al.* Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives. *Waste and Biomass Valorization*. 2020; 11(3): 1019–1040. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00546-0>
14. González R., Peña D.C., Gómez X. Anaerobic Co-Digestion of Wastes: Reviewing Current Status and Approaches for Enhancing Biogas Production. *Applied Sciences*. 2022; 12(17): 8884. <https://doi.org/10.3390/app12178884>
15. Dębowski M. *et al.* The Effects of Microalgae Biomass Co-Substrate on Biogas Production from the Common Agricultural Biogas Plants Feedstock. *Energies*. 2020; 13(9): 2186. <https://doi.org/10.3390/en13092186>
16. Alharbi R.M. Anaerobic co-digestion of cow manure and microalgae to increase biogas production: A sustainable bioenergy source. *Journal of King Saud University — Science*. 2024; 39(9): 103380. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103380>
17. Kusmayadi A. *et al.* Integration of microalgae cultivation and anaerobic co-digestion with dairy wastewater to enhance bioenergy and biochemicals production. *Bioresource Technology*. 2023; 376: 128858. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128858>
18. Torres A., Padrino S., Brito A., Díaz L. Biogas production from anaerobic digestion of solid microalgae residues generated on different processes of microalgae-to-biofuel production. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023; 13(6): 4659–4672. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01898-9>
19. Vargas-Estrada L. *et al.* A Review on Current Trends in Biogas Production from Microalgae Biomass and Microalgae Waste by Anaerobic Digestion and Co-digestion. *BioEnergy Research*. 2022; 15(1): 77–92. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10276-2>
20. Vadiveloo A., Matos A.P., Chaudry S., Bahri P.A., Moheimani N.R. Effect of CO₂ addition on treating anaerobically digested abattoir effluent (ADAE) using *Chlorella* sp. (Trebouxiophyceae). *Journal of CO₂ Utilization*. 2020; 38: 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.02.006>
21. Sánchez-Quintero Á. *et al.* Effects of CO₂ and liquid digestate concentrations on the growth performance and biomass composition of *Tetraselmus obliquus* and *Chlorella vulgaris* microalgal strains. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2024; 12: 1459756. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1459756>
22. Politaeva N., Ilin I., Velmozhina K., Shinkevich P. Carbon Dioxide Utilization Using *Chlorella* Microalgae. *Environments*. 2023; 10(7): 109. <https://doi.org/10.3390/environments10070109>
23. Вельможина К.А. Совершенствование технологии анаэробного сбраживания органических отходов в энергетических целях. Выпускная квалификационная работа магистра. Санкт-Петербург 2023. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/3/2023/vr/vr23-2591>
24. Chusov A., Maslikov V., Badenko V., Zhazhkov V., Molodtsov D., Pavlushkina Y. Biogas Potential Assessment of the Composite Mixture from Duckweed Biomass. *Sustainability*. 2022; 14(1): 351. <https://doi.org/10.3390/su14010351>
25. Magdalena J.A., Ballesteros M., González-Fernandez C. Efficient Anaerobic Digestion of Microalgae Biomass: Proteins as a Key Macromolecule. *Molecules*. 2018; 23(5): 1098. <https://doi.org/10.3390/molecules23051098>
26. Herrmann C., Kalita N., Wall D., Xia A., Murphy J.D. Optimised biogas production from microalgae through co-digestion with carbon-rich co-substrates. *Bioresource Technology*. 2016; 214: 328–337. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.119>
27. Mahdy A., Fotidis I.A., Mancini E., Ballesteros M., González-Fernández C., Angelidaki I. Ammonia tolerant inocula provide a good base for anaerobic digestion of microalgae in third generation biogas process. *Bioresource Technology*. 2017; 225: 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.086>
28. Wu N. *et al.* Techno-Economic Analysis of Biogas Production from Microalgae through Anaerobic Digestion. Banu J.R. (ed.). Anaerobic Digestion. *IntechOpen*. 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86090>
9. Velmozhina K. *et al.* Production of Biohydrogen from Microalgae Biomass after Wastewater Treatment and Air Purification from CO₂. *Processes*. 2023; 11(10): 2978. <https://doi.org/10.3390/pr11102978>
10. Kougias P.G., Angelidaki I. Biogas and its opportunities — A review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2018; 12(3): 14. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>
11. Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010; 85(4): 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
12. Ngabala F.J., Emmanuel J.K. Potential substrates for biogas production through anaerobic digestion—an alternative energy source. *Helion*. 2024; 10(23): e40632. <https://doi.org/10.1016/j.helion.2024.e40632>
13. Atelge M.R. *et al.* Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives. *Waste and Biomass Valorization*. 2020; 11(3): 1019–1040. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00546-0>
14. González R., Peña D.C., Gómez X. Anaerobic Co-Digestion of Wastes: Reviewing Current Status and Approaches for Enhancing Biogas Production. *Applied Sciences*. 2022; 12(17): 8884. <https://doi.org/10.3390/app12178884>
15. Dębowski M. *et al.* The Effects of Microalgae Biomass Co-Substrate on Biogas Production from the Common Agricultural Biogas Plants Feedstock. *Energies*. 2020; 13(9): 2186. <https://doi.org/10.3390/en13092186>
16. Alharbi R.M. Anaerobic co-digestion of cow manure and microalgae to increase biogas production: A sustainable bioenergy source. *Journal of King Saud University — Science*. 2024; 39(9): 103380. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103380>
17. Kusmayadi A. *et al.* Integration of microalgae cultivation and anaerobic co-digestion with dairy wastewater to enhance bioenergy and biochemicals production. *Bioresource Technology*. 2023; 376: 128858. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128858>
18. Torres A., Padrino S., Brito A., Díaz L. Biogas production from anaerobic digestion of solid microalgae residues generated on different processes of microalgae-to-biofuel production. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023; 13(6): 4659–4672. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01898-9>
19. Vargas-Estrada L. *et al.* A Review on Current Trends in Biogas Production from Microalgae Biomass and Microalgae Waste by Anaerobic Digestion and Co-digestion. *BioEnergy Research*. 2022; 15(1): 77–92. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10276-2>
20. Vadiveloo A., Matos A.P., Chaudry S., Bahri P.A., Moheimani N.R. Effect of CO₂ addition on treating anaerobically digested abattoir effluent (ADAE) using *Chlorella* sp. (Trebouxiophyceae). *Journal of CO₂ Utilization*. 2020; 38: 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.02.006>
21. Sánchez-Quintero Á. *et al.* Effects of CO₂ and liquid digestate concentrations on the growth performance and biomass composition of *Tetraselmus obliquus* and *Chlorella vulgaris* microalgal strains. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2024; 12: 1459756. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1459756>
22. Politaeva N., Ilin I., Velmozhina K., Shinkevich P. Carbon Dioxide Utilization Using *Chlorella* Microalgae. *Environments*. 2023; 10(7): 109. <https://doi.org/10.3390/environments10070109>
23. Вельможина К.А. Совершенствование технологии анаэробного сбраживания органических отходов в энергетических целях. Выпускная квалификационная работа магистра. Санкт-Петербург 2023. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/3/2023/vr/vr23-2591>
24. Chusov A., Maslikov V., Badenko V., Zhazhkov V., Molodtsov D., Pavlushkina Y. Biogas Potential Assessment of the Composite Mixture from Duckweed Biomass. *Sustainability*. 2022; 14(1): 351. <https://doi.org/10.3390/su14010351>
25. Magdalena J.A., Ballesteros M., González-Fernandez C. Efficient Anaerobic Digestion of Microalgae Biomass: Proteins as a Key Macromolecule. *Molecules*. 2018; 23(5): 1098. <https://doi.org/10.3390/molecules23051098>
26. Herrmann C., Kalita N., Wall D., Xia A., Murphy J.D. Optimised biogas production from microalgae through co-digestion with carbon-rich co-substrates. *Bioresource Technology*. 2016; 214: 328–337. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.119>
27. Mahdy A., Fotidis I.A., Mancini E., Ballesteros M., González-Fernández C., Angelidaki I. Ammonia tolerant inocula provide a good base for anaerobic digestion of microalgae in third generation biogas process. *Bioresource Technology*. 2017; 225: 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.086>
28. Wu N. *et al.* Techno-Economic Analysis of Biogas Production from Microalgae through Anaerobic Digestion. Banu J.R. (ed.). Anaerobic Digestion. *IntechOpen*. 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86090>

29. Nolla-Ardèvol V., Strous M., Tegetmeyer H. Anaerobic digestion of the microalga *Spirulina* at extreme alkaline conditions: biogas production, metagenome, and metatranscriptome. *Frontiers in Microbiology*. 2015; 6: 597. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00597>
30. González-Fernández C., Sialve B., Molinuevo-Salces B. Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs. *Bioresource Technology*. 2015; 198: 896–906. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.095>
31. Kannah R.Y., Kavitha S., Karthikeyan O.P., Rene E.R., Kumar G., Banu J.R. A review on anaerobic digestion of energy and cost effective microalgae pretreatment for biogas production. *Bioresource Technology*. 2021; 332: 125055. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125055>
32. Xiao C. et al. Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion. *Renewable Energy*. 2020; 151: 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.145>
33. Nagarajan D., Lee D.-J., Chang J.-S. Integration of anaerobic digestion and microalgal cultivation for digestate bioremediation and biogas upgrading. *Bioresource Technology*. 2019; 290: 121804. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121804>
29. Nolla-Ardèvol V., Strous M., Tegetmeyer H. Anaerobic digestion of the microalga *Spirulina* at extreme alkaline conditions: biogas production, metagenome, and metatranscriptome. *Frontiers in Microbiology*. 2015; 6: 597. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00597>
30. González-Fernández C., Sialve B., Molinuevo-Salces B. Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs. *Bioresource Technology*. 2015; 198: 896–906. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.095>
31. Kannah R.Y., Kavitha S., Karthikeyan O.P., Rene E.R., Kumar G., Banu J.R. A review on anaerobic digestion of energy and cost effective microalgae pretreatment for biogas production. *Bioresource Technology*. 2021; 332: 125055. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125055>
32. Xiao C. et al. Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion. *Renewable Energy*. 2020; 151: 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.145>
33. Nagarajan D., Lee D.-J., Chang J.-S. Integration of anaerobic digestion and microalgal cultivation for digestate bioremediation and biogas upgrading. *Bioresource Technology*. 2019; 290: 121804. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121804>

ОБ АВТОРАХ

Ксения Алексеевна Вельможина

инженер
anizhomlev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9623-057X>

Полина Сергеевна Шинкевич

инженер
ps.shinkevich@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-3627-281X>

Наталья Анатольевна Политаева

доктор технических наук, профессор
politaevana1971@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>

Александр Николаевич Чусов

кандидат технических наук, доцент
chusov17@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1388-8649>

Владимир Иванович Масликов

доктор технических наук, профессор
maslikov_vi@spbstu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4817-7924>

Анна Михайловна Опарина

ассистент
annaoparina93@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2043-1866>

Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого,
ул. Политехническая, 29Б, Санкт-Петербург, 195251,
Россия

29. Nolla-Ardèvol V., Strous M., Tegetmeyer H. Anaerobic digestion of the microalga *Spirulina* at extreme alkaline conditions: biogas production, metagenome, and metatranscriptome. *Frontiers in Microbiology*. 2015; 6: 597. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00597>

30. González-Fernández C., Sialve B., Molinuevo-Salces B. Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs. *Bioresource Technology*. 2015; 198: 896–906. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.095>

31. Kannah R.Y., Kavitha S., Karthikeyan O.P., Rene E.R., Kumar G., Banu J.R. A review on anaerobic digestion of energy and cost effective microalgae pretreatment for biogas production. *Bioresource Technology*. 2021; 332: 125055. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125055>

32. Xiao C. et al. Life cycle and economic assessments of biogas production from microalgae biomass with hydrothermal pretreatment via anaerobic digestion. *Renewable Energy*. 2020; 151: 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.145>

33. Nagarajan D., Lee D.-J., Chang J.-S. Integration of anaerobic digestion and microalgal cultivation for digestate bioremediation and biogas upgrading. *Bioresource Technology*. 2019; 290: 121804. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121804>

ABOUT THE AUTHORS

Ksenia Alekseevna Velmozhina

Engineer
anizhomlev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9623-057X>

Polina Sergeevna Shinkevich

Engineer
ps.shinkevich@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-3627-281X>

Natalia Anatolyevna Politaeva

Doctor of Technical Sciences, Professor
politaevana1971@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5914-6210>

Alexander Nikolaevich Chusov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
chusov17@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1388-8649>

Vladimir Ivanovich Maslikov

Doctor of Technical Sciences, Professor
maslikov_vi@spbstu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4817-7924>

Anna Mikhailovna Oparina

Assistant
annaoparina93@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2043-1866>

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU),
29B Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251,
Russia