

Научная статья

УДК 663.1

DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-50-63

**Влияние концентрации макроэлементов на рост, содержание
фотосинтетических пигментов и состав жирных кислот микроводоросли
*Scenedesmus rubescens***

Алена Алексеевна Чижова^{1✉}, Екатерина Александровна Буденкова²,
Владимир Сергеевич Шушарин³, Любовь Сергеевна Дышлюк⁴

^{1,2,3,4}Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград,
Россия

¹alena_chizhova_2019@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-3875-8437>

²budenkovakaterina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4854-5459>

³vova-shusharin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4477-2764>

⁴soldatovals1984@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7333-8411>

Аннотация. Увеличение выбросов парниковых газов и истощение запасов ископаемого топлива ставят под угрозу устойчивое развитие и здоровье населения. В этих условиях возрастает интерес к микроводорослям, которые способны смягчить эти вызовы благодаря высокой продуктивности и широкому спектру применений. Виды рода *Scenedesmus* представляются перспективным сырьем для производства биодизеля и получения пигментов. В настоящей работе исследовалось влияние состава питательной среды на рост, накопление пигментов и жирнокислотный профиль микроводоросли *Scenedesmus rubescens* D-292. Культивирование штамма осуществлялось на среде Громова с различным содержанием KNO_3 (0,1, 1,0 и 10 г/л), $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$ (0 и 0,262 г/л), $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ и NaHCO_3 (0, 0,2 и 2,0 г/л). Максимальный рост штамма, накопление пигментов (10 мг/г сух. биомассы) и полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) (65 % от общего количества жирных кислот (ЖК)) отмечены при избытке в среде источника серы (2,0 г/л $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) и дефиците азота, фосфора и углерода. Наибольший выход ЖК (229,9 мг/г сух. биомассы) зафиксирован при избытке в среде источника углерода (2,0 г/л NaHCO_3) и ограничении других макроэлементов. В липидном профиле штамма преобладали пальмитиновая (14,4–17,5 %), олеиновая (13,8–29,1 %), линолевая (10,1–13,8 %) и α -линоленовая (19,7–36,7 %) кислоты. Несмотря на ограниченный потенциал штамма для производства биодизеля, он представляет интерес как источник натуральных пигментов и липидов, богатых ПНЖК и α -линоленовой кислотой (до 37 % от общего количества ЖК).

Ключевые слова: микроводоросли, *Scenedesmus*, культивирование, липиды, жирные кислоты, биодизель, пигменты.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-672 от 18.09.2024).

Для цитирования: Чижова А. А., Буденкова Е. А., Шушарин В. С., Дышлюк Л. С. Влияние концентрации макроэлементов на рост, содержание фотосинтетических пигментов и состав жирных кислот микроводоросли *Scenedesmus rubescens* // Известия КГТУ. 2026. № 80. С. 50–63. DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-50-63.

Original article

Influence of macronutrient concentration on the growth, photosynthetic pigment content, and fatty acid composition of the microalga *Scenedesmus rubescens*

Alena A. Chizhova¹✉, Ekaterina A. Budenkova², Vladimir S. Shusharin³, Lyubov S. Dyshlyuk⁴

^{1,2,3,4}Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

¹alena_chizhova_2019@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3875-8437>

²budenkovakaterina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4854-5459>

³vova-shusharin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4477-2764>

⁴soldatovals1984@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7333-8411>

Abstract. The rise in greenhouse gas emissions and the depletion of fossil fuel reserves threaten sustainable development and public health. In this context, microalgae are receiving increasing attention owing to their high productivity and broad biotechnological potential. Species of the genus *Scenedesmus* are considered promising raw materials for biodiesel production as well as for obtaining natural pigments with diverse biological activities. This study examines the effect of nutrient medium composition on the growth, pigment accumulation, and fatty acid profile of the microalga *Scenedesmus rubescens* D-292. The microalga has been cultivated in Gromov's medium with varying concentrations of KNO₃ (0.1, 1.0, and 10 g L⁻¹), K₂HPO₄×3H₂O (0 and 0.262 g L⁻¹), MgSO₄×7H₂O и NaHCO₃ (0, 0.2, and 2.0 g L⁻¹). The highest growth rate, pigment content (10 mg g⁻¹ dry biomass) and proportion of polyunsaturated fatty acids (65% of total fatty acids) has been observed under sulfur-rich conditions (2.0 g L⁻¹ MgSO₄×7H₂O) combined with nitrogen, phosphorus, and carbon limitation. The highest fatty acid yield (229.9 mg g⁻¹ dry biomass) has been obtained under carbon-rich conditions (2.0 g L⁻¹ NaHCO₃) with limited availability of other macronutrients. The lipid profile of the strain has been dominated by palmitic (14.4–17.5 %), oleic (13.8–29.1 %), linoleic (10.1–13.8 %), and α-linolenic (19.7–36.7 %) acids. Although the strain exhibits limited potential for biodiesel production, it demonstrates potential as a source of natural pigments and lipids rich in polyunsaturated fatty acids, particularly α-linolenic acid (up to 37% of total fatty acids).

Keywords: microalgae, *Scenedesmus*, cultivation, lipids, fatty acids, biodiesel, pigments.

Funding: this research has been carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-672 dated September 18, 2024).

For citation: Chizhova A. A., Budenkova E. A., Shusharin V. S., Dyshlyuk L. S. Influence of macronutrient concentration on the growth, photosynthetic pigment content, and fatty acid composition of the microalga *Scenedesmus rubescens*.

Izvestiya KGTU = KSTU News. 2026;(80):50–63. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-80-50-63.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается рост мирового спроса на ископаемое топливо, что приводит к истощению его запасов и ухудшению экологической ситуации за счет выбросов парниковых газов. Сегодня более 80 % мирового потребления энергии приходится на ископаемые источники, такие как нефть, уголь или природный газ, при этом ожидается, что к 2050 г. потребление энергии вырастет на 50 % по сравнению с 2020 г. В этой связи переход к возобновляемым источникам энергии становится ключевым фактором для снижения выбросов в атмосферу и обеспечения энергетической безопасности [1, 2]. Биодизель, получаемый путем переэтерификации возобновляемых липидов, рассматривается как экологически безопасная альтернатива традиционному дизельному топливу. За последние два десятилетия достигнут значительный прогресс в области получения биодизеля из биомассы микроводорослей [3].

Микроводоросли – фотосинтезирующие микроорганизмы, которые находят применение в различных отраслях, начиная с пищевой промышленности и заканчивая биоэнергетикой. Благодаря высокой скорости роста и способности накапливать значительное количество липидов (до 70 % от сухой биомассы), эти микроорганизмы считаются важным сырьем для получения биотоплива третьего поколения – биодизеля, биоэтанола, биобутанола, биогаза и биоводорода [4, 5]. Представители рода *Scenedesmus* являются продуцентами липидов, содержание которых в сухой биомассе достигает 20–60 %. Липидный профиль этих микроводорослей характеризуется повышенным содержанием ЖК с длиной цепи C16–C18, что делает виды *Scenedesmus* подходящим сырьем для производства биодизеля с улучшенными характеристиками сгорания и устойчивостью к низким температурам [6, 7]. *Scenedesmus* также накапливают фотосинтетические пигменты – хлорофиллы и каротиноиды (астаксантин, β -каротин, кантаксантин), используемые в пищевой, фармацевтической и косметической отраслях [8, 9].

Композиция питательных сред оказывает существенное влияние на рост микроводорослей и их биохимический состав. Регулирование уровня питательных веществ позволяет целенаправленно модулировать метаболизм микроводорослей и усиливать синтез целевых соединений. Создание стрессовых условий за счет ограничения поступления азота или фосфора позволяет усиливать аккумуляцию липидов и изменять жирнокислотный состав клеток микроводорослей [10]. Показано, что контролируемое ограничение азота (0,1 г/л NaNO_3) в среде BBM при двухэтапном культивировании микроводоросли *Scenedesmus obliquus* CCAP 276/3A приводит к увеличению содержания липидов с 33 до 45 % от сухого веса [11]. Дефицит азота также ассоциируется с повышенным синтезом каротиноидов в биомассе *Scenedesmus* и других микроводорослей [12, 13].

Целью настоящего исследования являлась оценка влияния доступности макроэлементов (углерода, фосфора, серы и азота) в питательной среде на рост, содержание фотосинтетических пигментов и состав ЖК микроводоросли *Scenedesmus rubescens*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Штамм *Scenedesmus rubescens* (Dang.) Kessler, Schafer, Hummer, Kloboucek et Huss D-292 (далее *S. rubescens* D-292) получен из коллекции микроводорослей и цианобактерий IPPAS Института физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН. Для выращивания микроводоросли использовали классическую питательную среду Громова [14]. Культивирование проводили при температуре 25 ± 2 °C, интенсивности освещения 160 мкмоль/(м²с) (белые светодиодные лампы) и фотопериоде 16:8 ч света/темноты.

В рамках эксперимента *S. rubescens* D-292 выращивали на трех модификациях среды Громова (G1-G3) в течение 14 сут. Модифицированные среды характеризовались различными концентрациями следующих компонентов: KNO₃, K₂HPO₄×3H₂O, MgSO₄×7H₂O и NaHCO₃ (табл. 1). Содержание остальных компонентов модифицированных сред соответствовало классической среде Громова. Контроль – классическая среда Громова. Рост штамма оценивали путем фиксирования оптической плотности суспензий при 750 нм на 0, 4, 7 и 14 сутки культивирования. Сбор биомассы осуществляли путем центрифугирования (3900 об./мин, 10 мин). Клеточные осадки сублимационно высушивали и хранили при температуре –20 °C до проведения последующих анализов.

Таблица 1. Питательные среды для культивирования *S. rubescens* D-292

Table 1. Nutrient media for cultivation of *S. rubescens* D-292

Компоненты среды, г/л	Питательные среды			
	Контроль	G1	G2	G3
KNO ₃	1,0	10	0,1	0,1
K ₂ HPO ₄ ×3H ₂ O	0,262	0	0	0
MgSO ₄ ×7H ₂ O	0,2	0	2,0	0
NaHCO ₃	0,2	0	0	2,0

Для определения содержания фотосинтетических пигментов 50 мг лиофилизированной биомассы экстрагировали 5 мл 90 %-го ацетона. Смесь обрабатывали ультразвуком (амплитуда 40 %, 5 мин, на льду) для разрушения клеточных стенок, после чего центрифугировали при 3900 об./мин в течение 10 мин. Супернатант отбирали, а экстракцию повторяли до обесцвечивания растворителя. Общее содержание хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически по значениям оптической плотности при 470, 645 и 662 нм с использованием уравнений, приведенных в работе [15].

Жирнокислотный состав липидов анализировали методом газовой хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией (ГХ-МС) [16]. Сухую биомассу (20–30 мг) обрабатывали 1 М КОН в 80 %-ом водном этаноле с добавлением маргариновой кислоты (1000 мкг/мл, внутренний стандарт). Свободные ЖК экстрагировали *n*-гексаном. Полученный раствор высушивали в потоке аргона. Сухой остаток обрабатывали 1 % H₂SO₄ в абсолютном метаноле и инкубировали 30 мин при 55 °C для получения метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК). Полученные МЭЖК экстрагировали *n*-гексаном и хранили при –20 °C до анализа. Анализ МЭЖК выполняли на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000 (Хроматэк, Россия) с квадрупольным масс-детектором и капиллярной

колонок CR-FAME (100 м × 0,25 мм). Объем вводимой пробы – 1 мкл, газ-носитель – гелий (1 мл/мин). Температурная программа печи была следующей: 8 мин удержание при 60 °С, нагрев от 60 до 175 °С со скоростью 10 °С/мин (5 мин удержание при этой температуре), до 250 °С – со скоростью 9 °С/мин (24 мин удержание при этой температуре). Рабочая температура источника ионов масс-детектора составляла 230 °С, энергия ионизации – 70 эВ, диапазон сканирования масс – 50– 450 m/z.

Статистическая обработка данных и построение графиков осуществляли с помощью программного обеспечения OriginPro 2025 (OriginLab Corp., США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано на рис. 1, максимальная плотность культуры ($0,42 \pm 0,04$) к концу культивирования наблюдалась на модифицированной среде G2 с повышенным содержанием серы (2 г/л $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$), дефицитом азота (0,1 г/л KNO_3) и отсутствием источников фосфора (0 г/л $\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$) и углерода (0 г/л NaHCO_3). Увеличение концентрации NaHCO_3 до 2 г/л при одновременном дефиците остальных макроэлементов в среде G3 привело к снижению темпов роста *S. rubescens* D-292 по сравнению со средой G2. В то же время минимальный рост штамма наблюдался на контрольной среде и среде G1, содержащей повышенную концентрацию азота (10 г/л KNO_3) при отсутствии других макроэлементов.

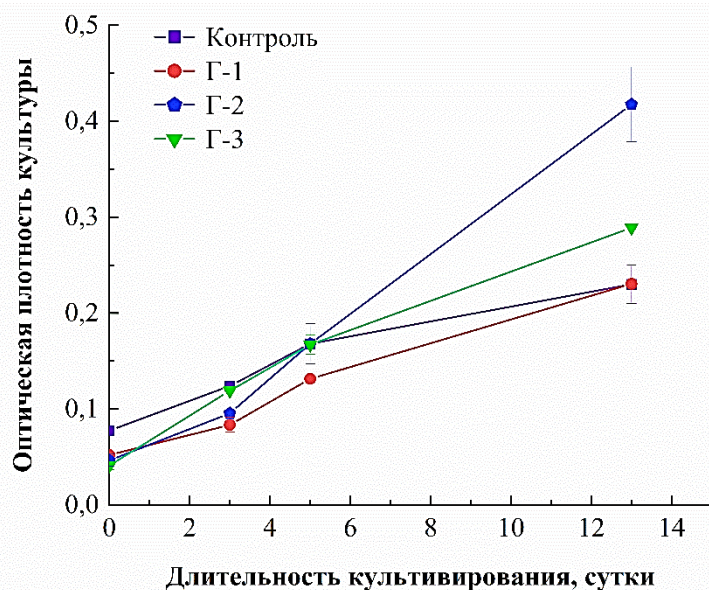


Рис. 1. Кривые роста микроводоросли *S. rubescens* D-292 при культивировании на средах различного состава

Fig. 1. Growth curves of the microalga *S. rubescens* D-292 cultivated in media of different compositions

Полученные результаты показывают, что рост *S. rubescens* D-292 зависит от доступности макроэлементов в среде Громова, при этом наибольшее влияние оказывает содержание MgSO_4 . Сера является необходимым элементом для нормальной жизнедеятельности микроводорослей, ее дефицит приводит к снижению

накопления биомассы вследствие нарушения целостности клеточных мембран, а также угнетения синтеза витаминов, регуляторных соединений и вторичных метаболитов [17]. Культивирование *S. rubescens* D-292 на среде G2, содержащей повышенную концентрацию MgSO_4 (2 г/л), обеспечивало наибольшую плотность клеток по сравнению с другими средами, что согласуется с литературными данными о стимулирующем действии серы на рост различных видов микроводорослей [18–20].

Микроводоросли также рассматриваются как источник натуральных пигментов с широкой палитрой оттенков и разнообразной биологической активностью [21]. Из рис. 2 видно, что накопление пигментов в биомассе *S. rubescens* D-292 варьировало в зависимости от состава питательной среды. Максимальное содержание хлорофилла *a* ($4,12 \pm 0,94$ мг/г сух. веса) зафиксировано в культуре, выращенной на среде G2. Аналогичная тенденция отмечалась и для хлорофилла *b*, содержание которого достигало $3,57 \pm 0,24$ мг/г. Наибольшее накопление каротиноидов наблюдалось на средах G2 и G3 – $2,44 \pm 0,33$ мг/г и $2,18 \pm 0,49$ мг/г соответственно. На контрольной среде и в варианте G1 содержание хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов было минимальным.

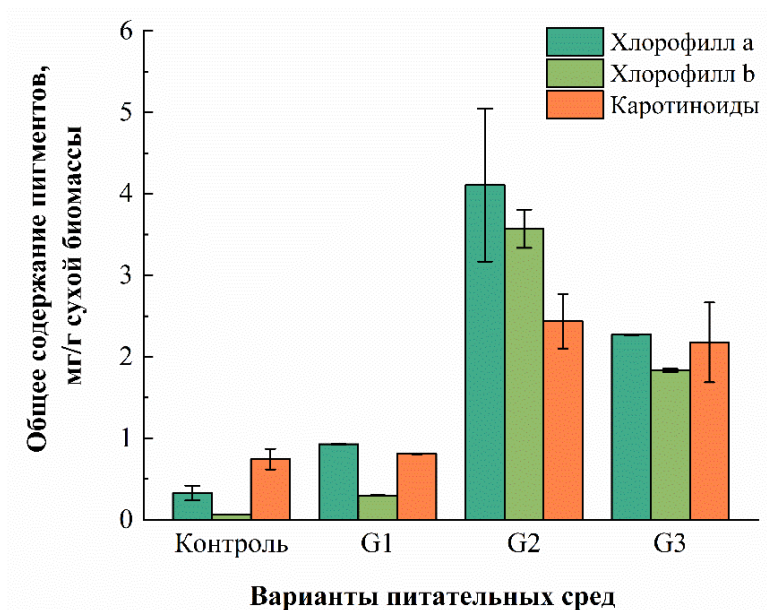


Рис. 2. Общее содержание хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов в биомассе *S. rubescens* D-292 при культивировании на средах различного состава
Fig. 2. Total chlorophyll (*a* and *b*) and carotenoid content in *S. rubescens* D-292 biomass cultivated in media of different compositions

Как следствие, модифицированные среды G2 и G3 обеспечивали увеличение выхода хлорофиллов (*a* и *b*) и каротиноидов по сравнению с контролем. Эти данные согласуются с данными предыдущего исследования [22], где показано, что азотное голодание способствует увеличению концентрации каротиноидов в культуре *S. rubescens* KNUA042 до 1,8 мг/л.

Жирнокислотный состав является ключевым показателем пригодности липидов микроводорослей для производства биодизельного топлива. Для получения

качественного биодизеля липиды должны включать как насыщенные короткоцепочечные жирные кислоты (НЖК; C16:0 и C18:0), так и мононенасыщенные жирные кислоты (МНЖК; C16:1 и C18:1) [23]. При культивировании на исследуемых питательных средах микроводоросль *S. rubescens* D-292 аккумулировала 70,2–229,9 мг/г сух. биомассы МЭЖК (рис. 3). Максимальная концентрация МЭЖК ($229,9 \pm 6,3$ мг/г) зафиксирована на среде G3. На средах G1 и G2 содержание МЭЖК было примерно в 1,5 раза ниже по сравнению с контролем – $70,2 \pm 3,3$ мг/г и $76,6 \pm 7,2$ мг/г соответственно.

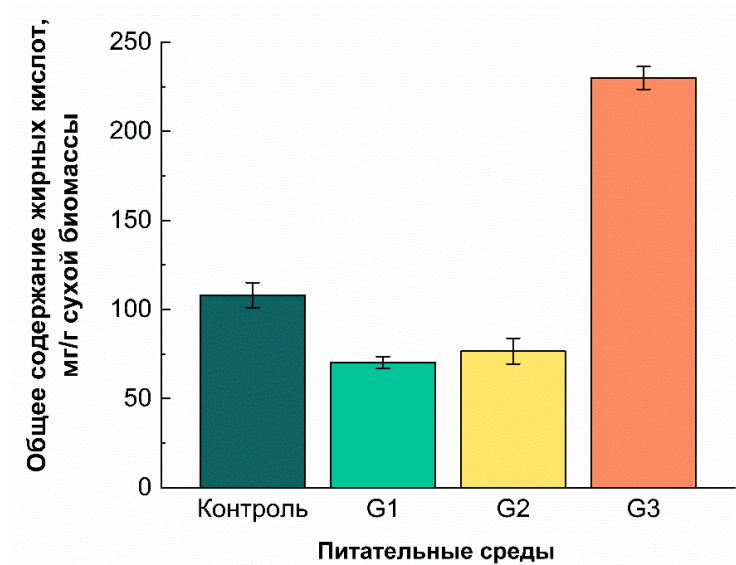


Рис. 3. Общее содержание МЭЖК штамма *S. rubescens* D-292 при культивировании на средах различного состава

Fig. 3. Total FAME content of *S. rubescens* strain cultivated in media of varying composition

Сочетание повышенного содержания углерода (2 г/л NaHCO_3) и ограниченного количества азота (0,1 г/л KNO_3) в среде G3 способствовало накоплению липидов в клетках *S. rubescens* D-292. Полученные результаты сопоставимы с данными литературы, согласно которым азотное голодание приводит к увеличению выхода липидов и ЖК у представителей *Scenedesmus* [24, 25]. Sonkar и Mallick [26] показали, что дефицит KNO_3 стимулирует биосинтез липидов в культуре *S. obliquus*, одновременно ограничивая производство биомассы после седьмых суток культивирования. При азотном голодании микроводоросли перенаправляют метаболические потоки от синтеза белков и нуклеиновых кислот к образованию триацилглицеринов и запасных липидов. Доступность углерода также является ключевым метаболическим фактором для биосинтеза крахмала и липидов в клетках микроводорослей. Поступление избыточного углерода в условиях азотного голодания приводит к перенаправлению метаболизма микроводорослей от процессов роста и синтеза белков к накоплению липидов, главным образом триацилглицеринов [27].

Из рис. 4 видно, что в жирнокислотном профиле липидов штамма *S. rubescens* D-292 доминировали ПНЖК, доля которых составляла от 48,1 до 64,7 % от общего содержания ЖК. Доля МНЖК находилась в пределах 17,8–32,9 %, а НЖК – от 17,5 до 19,3 %. При культивировании штамма на

модифицированной среде G2 содержание ПНЖК было максимальным и достигало $64,7 \pm 0,6$ %. С другой стороны, увеличение доли МНЖК (до 32,9 %) обеспечивала питательная среда G3.

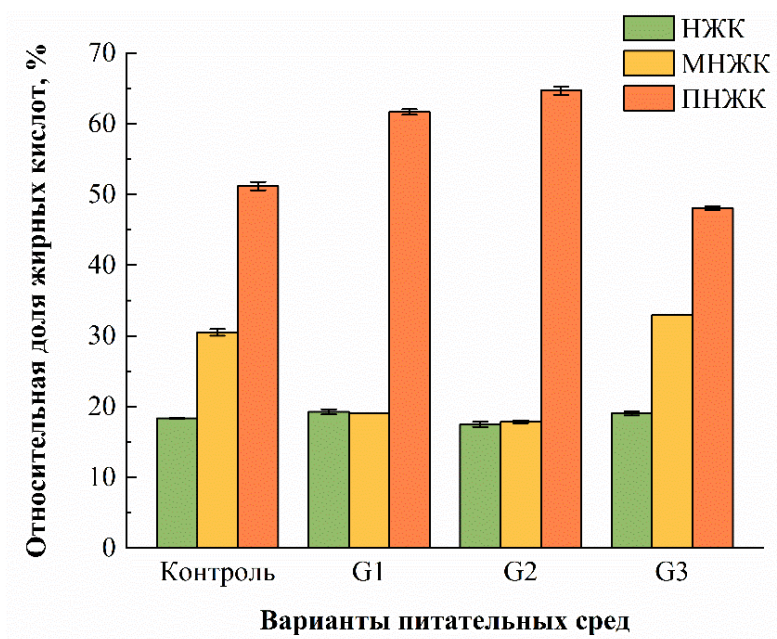


Рис. 4. Распределение НЖК, МНЖК и ПНЖК в профиле жирных кислот штамма *S. rubescens* D-292 при культивировании на различных питательных средах
Fig. 4. Distribution of SFA, MUFA and PUFA in the fatty acid profile of *S. rubescens* D-292 when cultivated on media of different compositions

В липидном профиле *S. rubescens* D-292 преобладали пальмитиновая (C16:0, 14,4–17,5 %), олеиновая (C18:1Δ9, 13,8–29,1 %), линолевая (C18:2Δ9,12, 10,1–13,8 %) и α-линоленовая (C18:3Δ9,12,15, 19,7–36,7 %) кислоты. При культивировании штамма на средах G1 и G2 увеличивалась доля α-линоленовой кислоты до $34,2 \pm 0,1$ % и $36,7 \pm 0,2$ % соответственно. Lv и соавторы [28] также сообщают, что липидный профиль *S. rubescens* SX отличается высоким содержанием ПНЖК, преимущественно линолевой и α-линоленовой, составляющих 48,9–55,2 % от общего количества ЖК. Модифицированная среда G3 способствовала повышенному накоплению олеиновой кислоты ($29,1 \pm 0,1$ %), тогда как при культивировании штамма на средах G1 и G2 ее содержание оставалось минимальным – $15,4 \pm 0,1$ % и $13,8 \pm 0,3$ % соответственно. Полученные результаты согласуются с работой [29], где показано, что *Scenedesmus obtusus* (ON089666.1) накапливает высокий уровень олеиновой кислоты, достигающий до 22,9 % от общего содержания ЖК.

Все вышесказанное подтверждает потенциал штамма *S. rubescens* D-292 для получения липидов, обогащенных ПНЖК (до 65 %), в частности α-линоленовой кислотой (до 37 %), однако высокий уровень ненасыщенных жирных кислот и низкое содержание пальмитиновой (до 17 %) и стеариновой (до 3 %) кислот ограничивают его применение в производстве биодизеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследовано влияние доступности макроэлементов (азота, фосфора, серы и углерода) на рост микроводоросли *S. rubescens* D-292, а также накопление фотосинтетических пигментов и ЖК. Результаты показали, что выращивание штамма *S. rubescens* D-292 в условиях повышенного содержания серы (2 г/л $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) и дефицита других макроэлементов способствовало его активному росту и накоплению фотосинтетических пигментов. В указанных условиях также наблюдалось увеличение доли ПНЖК в липидном профиле штамма – с 51,2 до 64,7 %, главным образом за счет повышения содержания α -линоленовой кислоты (с 24,1 до 36,7 %). При культивировании *S. rubescens* D-292 на среде с избытком источника углерода (2 г/л NaHCO_3) при дефиците азота, фосфора и серы отмечался активный рост штамма и максимальное накопление ЖК (229,9 мг/г сух. биомассы), в составе которых преобладала олеиновая кислота (до 29,1 %). Высокое содержание ПНЖК ограничивает потенциал штамма *S. rubescens* D-292 в производстве биодизельного топлива. Вместе с тем его биомасса представляет интерес в качестве источника натуральных пигментов и липидов, богатых ПНЖК, в частности ценными ω -3 (α -линоленовой) ЖК.

Список источников

1. Biofuels production: a review on sustainable alternatives to traditional fuels and energy sources / K. Malik, S. C. Capareda, B. R. Kamboj [et al.]. – DOI: 10.3390/fuels5020010 // Fuels. – 2024. – Vol. 5 (2). – P. 157–175.
2. El-Araby, R. Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future / R. El-Araby. – DOI: 10.1186/s13068-024-02571-9 // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. – 2024. – Vol. 17, 129.
3. Microalgae biofuels: illuminating the path to a sustainable future amidst challenges and opportunities / M. Wang, X. Ye, H. Bi [et al.]. – DOI: 10.1186/s13068-024-02461-0 // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. – 2024. – Vol. 17, 10.
4. The role of microalgae in the bioeconomy / F. G. A. Fernández, A. Reis, R. H. Wijffels [et al.]. – DOI: 10.1016/j.nbt.2020.11.011 // New Biotechnology. – 2021. – Vol. 61. – P. 99–107.
5. Biofuel production from microalgae: challenges and chances / A. T. Hoang, R. Sirohi, A. Pandey [et al.]. – DOI: 10.1007/s11101-022-09819-y // Phytochemistry Reviews. – 2023. – Vol. 22. – P. 1089–1126.
6. Comparison of monoculture and mixed culture (*Scenedesmus obliquus* and wild algae) for C, N, and P removal and lipid production / Z. Qu, P. Duan, X. Cao [et al.]. – DOI: 10.1007/s11356-019-05339-z // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26. – P. 20961–20968.
7. Effects of nitrogen forms and supply mode on lipid production of microalga *Scenedesmus obliquus* / M. An, L. Gao, W. Zhao [et al.]. – DOI: 10.3390/en13030697 // Energies. – 2020. – Vol. 13 (3), 697.
8. Biosynthesis and biotechnological interventions for commercial production of microalgal pigments: A review / A. Srivastava, M. Kalwani, H. Chakdar [et al.] // Bioresource Technology. – 2022. – Vol. 352, 127071.

9. Harnessing microalgae as sustainable cellular factories for biopharmaceutical production / H. Goshtasbi, Y. B. Okolodkov, A. Movafeghi [et al.]. – DOI: 10.1016/j.algal.2023.103237 // Algal Research. – 2023. – Vol. 74, 103237.
10. Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: an overview / M. A. Yaakob, R. M. S. R. Mohamed, A. Al-Gheethi [et al.]. – DOI: 10.3390/cells10020393 // Cells. – 2021. – Vol. 10 (2), 393.
11. Enhanced lipid production in *Scenedesmus obliquus* via nitrogen starvation in a two-stage cultivation process and evaluation for biodiesel production / J. Trivedi, D. Agrawal, N. Atray [et al.]. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123418 // Fuel. – 2022. – Vol. 316, 123418.
12. Corrêa, P. S. High-value compounds in three freshwater green micro-algae using nitrogen as an abiotic stressor: A study of the antioxidant potential of ethanolic extracts / P. S. Corrêa, M. M. Freitas, N. S. Caetano. – DOI: 10.1016/j.algal.2025.103964 // Algal Research. – 2025. – Vol. 86, 103964.
13. Unni, A. C. Therapeutic potential of microalga *Scenedesmus vacuolatus*: *In vitro* evaluation of antioxidant and anticancer activities / A. C. Unni, K. Karunakaran. – DOI: 10.1007/s41208-025-00809-3 // Thalassas: An International Journal of Marine Sciences. – 2025. – Vol. 41, 53.
14. Громов, Б. В. Коллекция культур водорослей лаборатории микробиологии биологического института Ленинградского Университета / Б. В. Громов // Культивирование коллекционных штаммов водорослей. – 1983. – С. 3–57.
15. Characterization and RNA-seq transcriptomic analysis of a *Scenedesmus obliquus* mutant with enhanced photosynthesis efficiency and lipid productivity / Y. Xi, L. Yin, Z. Y. Chi [et al.]. – DOI: 10.1038/s41598-021-88954-6 // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, 11795.
16. *Euonymus maximowiczianus* aril-derived long-term suspension-cultured cells: light and methyl jasmonate impact in the anthocyanin and VLCFA accumulation / A. V. Nosov, A. A. Fomenkov, R. A. Sidorov [et al.]. – DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.109293 // Plant Physiology and Biochemistry. – 2024. – Vol. 217, 109293.
17. Phosphorus and sulphur affecting the growth, nutrient uptake and amino acids composition in *Dunaliella salina* / Y. Sui, G. de Souza Celente, L. B. Navarro [et al.]. – DOI: 10.1016/j.procbio.2025.03.026 // Process Biochemistry. – 2025. – Vol. 153. – P. 276–283.
18. Morowvat, M. H. Effects of sulfur starvation on growth rates, biomass and lipid contents in the green microalga *Scenedesmus obliquus* / M. H. Morowvat, Y. Ghasemi. – DOI: 10.2174/1872208314666200109103059 // Recent Patents on Biotechnology. – 2020. – Vol. 14 (2). – P. 145–153.
19. Faruque, M. O. Photoautotrophic cultivation, lipid enhancement, and dry biomass characterization of microalgae *Scenedesmus dimorphus* for bioenergy application / M. O. Faruque, M. M. Hossain, S. A. Razzak. – DOI: 10.1007/s13369-023-08187-9 // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 48 (12). – P. 16263–16280.
20. Lipid accumulation during nitrogen and sulfur starvation in *Chlamydomonas reinhardtii* overexpressing a transcription factor / C. J. Salas-Montantes, O. González-Ortega, A. E. Ochoa-Alfaro [et al.]. – DOI: 10.1007/s13369-023-08187-9 // Journal of Applied Phycology. – 2018. – Vol. 30 (3). – P. 1721–1733.

21. Aizpuru, A. Traditional and new trend strategies to enhance pigment contents in microalgae / A. Aizpuru, A. González-Sánchez. – DOI: 0.1007/s11274-024-04070-3 // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2024. – Vol. 40, 272.
22. Nitrogen deficiency-dependent abiotic stress enhances carotenoid production in indigenous green microalga *Scenedesmus rubescens* KNUA042, for use as a potential resource of high value products / S. W. Jo, J. W. Hong, J. M. Do [et al.]. – DOI: 10.3390/su12135445 // Sustainability. – 2020. – Vol. 12 (13), 5445.
23. Impacts of the harvesting process on microalgae fatty acid profiles and lipid yields: Implications for biodiesel production / Z. Shokravi, H. Shokravi, A. E. Atabani [et al.]. – DOI: 10.1016/j.rser.2022.112410 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 161, 112410.
24. Interactive effect of temperature and nitrogen concentrations on the growth, biochemical composition, and fatty acid profiles in freshwater microalgae, *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus quadricauda* / A. Yuslan, H. Suhaimi, M. A. Ghaffar [et al.]. – DOI: 10.1007/s10811-025-03487-z // Journal of Applied Phycology. – 2025. – Vol. 37. – P. 1–24.
25. Abrha, G. T. Enhanced lipid accumulation in microalgae *Scenedesmus* sp. under nitrogen limitation / G. T. Abrha, A. Makaranga, P. P. Jutur. – DOI: 10.1016/j.enzmictec.2024.110546 // Enzyme and Microbial Technology. – 2025. – Vol. 182, 110546.
26. Sonkar, S. Development of a single phase nitrate feeding strategy for enhanced lipid productivity from green microalgae for biodiesel production / S. Sonkar, N. Mallick. – DOI: 10.1002/ep.12443 // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2017. – Vol. 36 (1). – P. 222–231.
27. Chen, H. Regulatory mechanisms of lipid biosynthesis in microalgae / H. Chen, Q. Wang. – DOI: 10.1111/brv.12759 // Biological Reviews. – 2021. – Vol. 96 (5). – P. 2373–2391.
28. Integration of wastewater treatment and flocculation for harvesting biomass for lipid production by a newly isolated self-flocculating microalga *Scenedesmus rubescens* SX / J. Lv, B. Guo, J. Feng [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118211 // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 240, 118211.
29. Enhanced lipid production and analysis of properties of biodiesel produced from freshwater microalgae *Scenedesmus obtusus* ON089666. 1 / V. Vinitha, S. Meignanalakshmi, K. G. Tirumurugan [et al.]. – DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101286 // Bioresource Technology Reports. – 2023. – Vol. 21, 101286.

References

1. Biofuels production: a review on sustainable alternatives to traditional fuels and energy sources / K. Malik, S. C. Capareda, B. R. Kamboj [et al.]. – DOI: 10.3390/fuels5020010 // Fuels. – 2024. – Vol. 5 (2). – P. 157–175.
2. El-Araby, R. Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future / R. El-Araby. – DOI: 10.1186/s13068-024-02571-9 // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. – 2024. – Vol. 17, 129.
3. Microalgae biofuels: illuminating the path to a sustainable future amidst challenges and opportunities / M. Wang, X. Ye, H. Bi [et al.]. – DOI: 10.1186/s13068-024-02461-0 // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. – 2024. – Vol. 17, 10.

4. The role of microalgae in the bioeconomy / F. G. A. Fernández, A. Reis, R. H. Wijffels [et al.]. – DOI: 10.1016/j.nbt.2020.11.011 // New Biotechnology. – 2021. – Vol. 61. – P. 99–107.
5. Biofuel production from microalgae: challenges and chances / A. T. Hoang, R. Sirohi, A. Pandey [et al.]. – DOI: 10.1007/s11101-022-09819-y // Phytochemistry Reviews. – 2023. – Vol. 22. – P. 1089–1126.
6. Comparison of monoculture and mixed culture (*Scenedesmus obliquus* and wild algae) for C, N, and P removal and lipid production / Z. Qu, P. Duan, X. Cao [et al.]. – DOI: 10.1007/s11356-019-05339-z // Environmental Science and Pollution Research. – 2019. – Vol. 26. – P. 20961–20968.
7. Effects of nitrogen forms and supply mode on lipid production of microalga *Scenedesmus obliquus* / M. An, L. Gao, W. Zhao [et al.]. – DOI: 10.3390/en13030697 // Energies. – 2020. – Vol. 13 (3), 697.
8. Biosynthesis and biotechnological interventions for commercial production of microalgal pigments: A review / A. Srivastava, M. Kalwani, H. Chakdar [et al.] // Bioresource Technology. – 2022. – Vol. 352, 127071.
9. Harnessing microalgae as sustainable cellular factories for biopharmaceutical production / H. Goshtasbi, Y. B. Okolodkov, A. Movafeghi [et al.]. – DOI: 10.1016/j.algal.2023.103237 // Algal Research. – 2023. – Vol. 74, 103237.
10. Influence of nitrogen and phosphorus on microalgal growth, biomass, lipid, and fatty acid production: an overview / M. A. Yaakob, R. M. S. R. Mohamed, A. Al-Gheethi [et al.]. – DOI: 10.3390/cells10020393 // Cells. – 2021. – Vol. 10 (2), 393.
11. Enhanced lipid production in *Scenedesmus obliquus* via nitrogen starvation in a two-stage cultivation process and evaluation for biodiesel production / J. Trivedi, D. Agrawal, N. Atray [et al.]. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123418 // Fuel. – 2022. – Vol. 316, 123418.
12. Corrêa, P. S. High-value compounds in three freshwater green micro-algae using nitrogen as an abiotic stressor: A study of the antioxidant potential of ethanolic extracts / P. S. Corrêa, M. M. Freitas, N. S. Caetano. – DOI: 10.1016/j.algal.2025.103964 // Algal Research. – 2025. – Vol. 86, 103964.
13. Unni, A. C. Therapeutic potential of microalga *Scenedesmus vacuolatus*: *In vitro* evaluation of antioxidant and anticancer activities / A. C. Unni, K. Karunakaran. – DOI: 10.1007/s41208-025-00809-3 // Thalassas: An International Journal of Marine Sciences. – 2025. – Vol. 41, 53.
14. Gromov, B. V. Collection of algal culture strains of the Laboratory of Microbiology of the Biological Institute of Leningrad University / B. V. Gromov // Cultivation of Collection Strains of Algae. – 1983. – P. 3–57.
15. Characterization and RNA-seq transcriptomic analysis of a *Scenedesmus obliquus* mutant with enhanced photosynthesis efficiency and lipid productivity / Y. Xi, L. Yin, Z. Y. Chi [et al.]. – DOI: 10.1038/s41598-021-88954-6 // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, 11795.
16. *Euonymus maximowiczianus* aril-derived long-term suspension-cultured cells: light and methyl jasmonate impact in the anthocyanin and VLCFA accumulation / A. V. Nosov, A. A. Fomenkov, R. A. Sidorov [et al.]. – DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.109293 // Plant Physiology and Biochemistry. – 2024. – Vol. 217, 109293.

17. Phosphorus and sulphur affecting the growth, nutrient uptake and amino acids composition in *Dunaliella salina* / Y. Sui, G. de Souza Celente, L. B. Navarro [et al.]. – DOI: 10.1016/j.procbio.2025.03.026 // Process Biochemistry. – 2025. – Vol. 153. – P. 276–283.
18. Morowvat, M. H. Effects of sulfur starvation on growth rates, biomass and lipid contents in the green microalga *Scenedesmus obliquus* / M. H. Morowvat, Y. Ghasemi. – DOI: 10.2174/1872208314666200109103059 // Recent Patents on Biotechnology. – 2020. – Vol. 14(2). – P. 145–153.
19. Faruque, M. O. Photoautotrophic cultivation, lipid enhancement, and dry biomass characterization of microalgae *Scenedesmus dimorphus* for bioenergy application / M. O. Faruque, M. M. Hossain, S. A. Razzak. – DOI: 10.1007/s13369-023-08187-9 // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 48(12). – P. 16263–16280.
20. Lipid accumulation during nitrogen and sulfur starvation in *Chlamydomonas reinhardtii* overexpressing a transcription factor / C. J. Salas-Montantes, O. González-Ortega, A. E. Ochoa-Alfaro [et al.]. – DOI: 10.1007/s13369-023-08187-9 // Journal of Applied Phycology. – 2018. – Vol. 30(3). – P. 1721–1733.
21. Aizpuru, A. Traditional and new trend strategies to enhance pigment contents in microalgae / A. Aizpuru, A. González-Sánchez. – DOI: 10.1007/s11274-024-04070-3 // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2024. – Vol. 40, 272.
22. Nitrogen deficiency-dependent abiotic stress enhances carotenoid production in indigenous green microalga *Scenedesmus rubescens* KNUA042, for use as a potential resource of high value products / S. W. Jo, J. W. Hong, J. M. Do [et al.]. – DOI: 10.3390/su12135445 // Sustainability. – 2020. – Vol. 12 (13), 5445.
23. Impacts of the harvesting process on microalgae fatty acid profiles and lipid yields: Implications for biodiesel production / Z. Shokravi, H. Shokravi, A. E. Atabani [et al.]. – DOI: 10.1016/j.rser.2022.112410 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 161, 112410.
24. Interactive effect of temperature and nitrogen concentrations on the growth, biochemical composition, and fatty acid profiles in freshwater microalgae, *Chlorella sorokiniana* and *Scenedesmus quadricauda* / A. Yuslan, H. Suhaimi, M. A. Ghaffar [et al.]. – DOI: 10.1007/s10811-025-03487-z // Journal of Applied Phycology. – 2025. – Vol. 37. – P. 1–24.
25. Abrha, G. T. Enhanced lipid accumulation in microalgae *Scenedesmus* sp. under nitrogen limitation / G. T. Abrha, A. Makaranga, P. P. Jutur. – DOI: 10.1016/j.enzmictec.2024.110546 // Enzyme and Microbial Technology. – 2025. – Vol. 182, 110546.
26. Sonkar, S. Development of a single phase nitrate feeding strategy for enhanced lipid productivity from green microalgae for biodiesel production / S. Sonkar, N. Mallick. – DOI: 10.1002/ep.12443 // Environmental Progress & Sustainable Energy. – 2017. – Vol. 36 (1). – P. 222–231.
27. Chen, H. Regulatory mechanisms of lipid biosynthesis in microalgae / H. Chen, Q. Wang. – DOI: 10.1111/brv.12759 // Biological Reviews. – 2021. – Vol. 96 (5). – P. 2373–2391.
28. Integration of wastewater treatment and flocculation for harvesting biomass for lipid production by a newly isolated self-flocculating microalga *Scenedesmus rubescens* SX / J. Lv, B. Guo, J. Feng [et al.]. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118211 // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 240. – 118211.

29. Enhanced lipid production and analysis of properties of biodiesel produced from freshwater microalgae *Scenedesmus obtusus* ON089666. 1 / V. Vinitha, S. Meignanalakshmi, K. G. Tirumurugaan [et al.]. – DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101286 // Bioresource Technology Reports. – 2023. – Vol. 21, 101286.

Информация об авторах

А. А. Чижова – аспирант 3-го года обучения Высшей школы живых систем БФУ им. И. Канта

Е. А. Буденкова – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Промышленные биотехнологии»

В. С. Шушарин – лаборант Научно-образовательного центра «Промышленные биотехнологии»

Л. С. Дышлюк – доктор технических наук, доцент, заведующая лабораторией микробиологии и биотехнологий

Information about the authors

A. A. Chizhova – 3rd-year PhD student at the Higher School of Living Systems, Immanuel Kant Baltic Federal University

E. A. Budenkova – Candidate of Technical sciences, junior researcher at the Scientific and Educational Center "Industrial Biotechnology"

V. S. Shusharin – Laboratory Assistant at the Scientific and Educational Center "Industrial Biotechnology"

L. S. Dyshlyuk – Doctor of Technical sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Microbiology and Biotechnology

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 11.12.2025; принята к публикации 20.12.2025.

The article was submitted 01.12.2025; approved after reviewing 11.12.2025; accepted for publication 20.12.2025.