

Ольга Вячеславовна Щепетнева<sup>1✉</sup>, Софья Кирилловна Митрофанова<sup>2</sup>,  
Сергей Викторович Трифонов<sup>3</sup>, Николай Сергеевич Мануковский<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>1</sup>oxboxb12@gmail.com

<sup>2</sup>m1tes@mail.ru

<sup>3</sup>trifonov\_sergei@inbox.ru

<sup>4</sup>mana49@mail.ru

## ВОДНОЕ РАСТЕНИЕ *LEMNA MINOR* КАК ВОЗМОЖНЫЙ КОМПОНЕНТ ФОТОТРОФНОГО ЗВЕНА В СИСТЕМАХ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

Цель исследования – комплексный анализ потенциала *L. minor* как ключевого компонента биологических систем жизнеобеспечения (БСЖО) с фокусом на ее нутритивную ценность и способность к замкнутому циклу регенерации отходов. Был произведен поиск научных статей отечественных и иностранных авторов в электронных базах Scopus, Web of Science, Elibrary, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley online Library, PubMed и других с последующим анализом информации. БСЖО решают множество проблем, связанных с освоением космоса. Прежде всего, это транспортировка воды, кислорода, еды и утилизация отходов. Благодаря тому, что такие процессы, как восстановление CO<sub>2</sub> до O<sub>2</sub>, производство еды, репродукция воды и переработка отходов, основаны на тех процессах, которые происходят в природе, биологические системы жизнеобеспечения представляются автономными, надежными и мало потребляющими ресурсы. Эту задачу берут на себя растения. Помимо этого данная технология может использоваться в местах с экстремальным климатом, таких как, например, полярные зоны и районы Крайнего Севера. Ряска малая (*Lemna minor*) – это маленькое, водное растение, растущее в стоячих водоемах или водоемах с медленным течением в самых разных условиях обитания. В некоторых исследованиях она продемонстрировала способность расти в условиях космического полета и способность использовать питательные вещества из отходов, перерабатывая их в питательную биомассу ряски. Также *L. minor* обладает высокой питательной ценностью, безопасна в употреблении человеком в качестве пищевой добавки и животными как часть основного рациона и имеет высокий уровень усвояемости у различных видов.

**Ключевые слова:** *Lemna minor*, система жизнеобеспечения, химический состав, фиторемедиация, усвояемость, питательная ценность

**Для цитирования:** Щепетнева О.В., Митрофанова С.К., Трифонов С.В., и др. Водное растение ряска *Lemna minor* как возможный компонент фототрофного звена в системах жизнеобеспечения // Вестник КрасГАУ. 2026. № 4. С. 45–59. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-45-59.

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FWES-2024-0041).

Olga Vyacheslavovna Shchepetneva<sup>1✉</sup>, Sofya Kirillovna Mitrofanova<sup>2</sup>,  
Sergey Viktorovich Trifonov<sup>3</sup>, Nikolay Sergeevich Manukovsky<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Institute of Biophysics, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

<sup>1</sup>oxboxb12@gmail.com

<sup>2</sup>m1tes@mail.ru

<sup>3</sup>trifonov\_sergei@inbox.ru

<sup>4</sup>mana49@mail.ru

## AQUATIC PLANT *LEMNA MINOR* AS A POSSIBLE PHOTOTROPHIC LINK COMPONENT IN LIFE-SUPPORT SYSTEMS

The aim of the study is to comprehensively analyze the potential of *L. minor* as a key component of biological life support systems (BLSS), focusing on its nutritional value and ability to support closed-loop waste regeneration. A search of scientific articles by Russian and international authors was conducted in Scopus, Web of Science, Elibrary, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, PubMed, and other databases, followed by data analysis. BLSS solve numerous problems associated with space exploration, primarily the transportation of water, oxygen, and food, and waste disposal. Because processes such as CO<sub>2</sub> reduction to O<sub>2</sub>, food production, water regeneration, and waste recycling are based on those occurring in nature, BLSSs are autonomous, reliable, and resource-efficient. Plants perform this function. Furthermore, this technology can be used in areas with extreme climates, such as polar zones and the Far North. *Lemna minor* is a small, aquatic plant that grows in still or slow-moving waters in a wide range of habitats. In some studies, it has demonstrated the ability to grow in spaceflight conditions and utilize nutrients from waste, converting them into nutritious duckweed biomass. *L. minor* also has high nutritional value, is safe for human consumption as a food supplement and as part of the diet of animals, and is highly digestible in various species.

**Keywords:** *Lemna minor*, life support system, chemical composition, phytoremediation, digestibility, nutritional value

**For citation:** Shchepetneva OV, Mitrofanova SK, Trifonov SV, et al. Aquatic plant *Lemna minor* as a possible phototrophic link component in life-support systems. *Bulletin of KSAU*. 2026;(4):45-59 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-45-59.

**Funding:** the study was conducted as part of a State Assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FWES-2024-0041).

**Введение.** Биологические системы жизнеобеспечения (БСЖО) являются перспективными проектами для освоения космоса. Наиболее известными примерами являются БИОС-3 (Россия), MELISSA (Бельгия, Франция, Испания, Канада), CELSS (США) и Лунный дворец (Китай) [1–3]. Системы жизнеобеспечения, работающие на основе биологических процессов, в которых центральную роль играют автотрофы, способны обеспечить экипаж съедобной биомассой, водой и кислородом, перерабатывая при этом продукты жизнедеятельности человека, тем самым обеспечивая замкнутость и автономность системы [3]. Помимо этого, данная технология может использоваться в местах с суровым климатом, таких как, например, пустынные зоны, Арктическая и Антарктическая зоны и районы Крайнего Севера [4, 5].

Подобная система БИОС-3 была реализована в Красноярске в Институте биофизики СО РАН в 1972 г. В данной системе удалось добиться полного замыкания по воде и кислороду, а продукты жизнедеятельности человека выводились из системы. В настоящее время в институте продолжают поиски решений по переработке и использованию отходов жизнедеятельности человека.

При выборе растений, которые будут выращиваться в космосе, приоритет отдается прежде всего питательной ценности и простоте выращивания [2]. Наряду с традиционными наземными культурами, значительный интерес представляют съедобные водные растения (водяной шпинат, кресс-салат, лотос), традиционно употребляемые в пищу во многих странах Восточной Азии [3, 6]. Среди них представители семейства *Lemnaceae*, в частности *Lemna minor*, выделяются высокой скоростью роста от 10 до 30 г·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup> и способностью к круглогодичному культивированию в контролируемых условиях, что делает их перспективными кандидатами для БСЖО [1, 7–9].

В отличие от многих высших растений, формирующих значительную долю несъедобной биомассы, вся биомасса *L. minor* пригодна к употреблению [3], что существенно повышает эффективность использования ресурсов в условиях БСЖО. Другой важной особенностью *L. minor* является способность к биоремедиации.

Помимо этого разрабатываются технологические схемы использования *L. minor* для переработки органических отходов человека с последующим использованием ее биомассы в качестве пищевой добавки для человека или кор-

ма для рыб, или других животных – кандидатов для включения в БСЖО, что также повысит замкнутость и устойчивость системы [3].

**Цель исследования** – комплексный анализ потенциала *L. minor* как ключевого компонента БСЖО с фокусом на ее нутритивную ценность и способность к замкнутому циклу регенерации отходов.

**Задачи:** провести анализ биохимического и минерального состава биомассы *L. minor* на основании данных из научной литературы для оценки потенциала ее использования в БСЖО в качестве корма добавки для животных и компонента пищевых добавок для человека; оценить возможности применения *L. minor* для очистки сточно-бытовых вод и поддержания экологического баланса в аквакультурных модулях БСЖО на основе данных, представленных в научных публикациях; оценить перспективы и возмож-

ности использования *L. minor* в БСЖО космического назначения на основе результатов научных исследований.

**Объекты и методы.** Был произведен поиск научных статей отечественных и иностранных авторов в таких электронных базах публикаций, как Scopus, Web of Science, Elibrary, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley online Library, PubMed и других с последующим анализом информации.

**Результаты и их обсуждение**

**Питательная ценность ряски.** *L. minor* обладает высоким питательным потенциалом. Содержание питательных веществ продемонстрировано в таблице 1. Кроме этого, в нее входит большое количество витаминов (витамины группы В, витамин С, D3, Р, К1 и Е), минералов, пигментов (β-каротин, α-токоферол, хлорофилл α и β, лютеин и зеаксантин), фенольных соединений.

Таблица 1

**Нутриентный профиль [10, 11]  
Nutrient profile [10, 11]**

Нутриент	Содержание, г/100 г
Вода	91–95
Белки	1–4
Углеводы	1–3
Пищевые волокна	0,5–3
Зола	1–2
Жиры	0,2–0,6

**Белки.** Виды ряски, в частности *L. minor*, имеют высокий потенциал как источник белка, содержание которого варьируется от 35 до 45 % в пересчете на сухую массу [6]. Содержание белка у рясковых сильно варьируется в зависимости от условий выращивания, например от интенсивности света, длительности облучения и температуры. Меняя их, можно значительно регулировать соотношение белков, жиров и углеводов (БЖУ) ряски [7]. Также выход биомассы ряски и скорость роста зависят от состава питательной среды. Особую роль в этом играет содержание N и P. Хафиз Улла и другие в своей работе доказали, что с увеличением концентрации N и P в среде увеличивается выход биомассы примерно в полтора раза в сравнении с контролем, и количество БЖУ также увеличилось [12].

Помимо этого, содержание белка зависит от метода экстракции и сушки растения. Важное

преимущество рясковых перед традиционными источниками белка (такими как соя) – отсутствие лектинов, которые нарушают всасывание питательных веществ, и их удаление требует термической обработки. Для ряски, включая *L. minor*, такая обработка не обязательна при использовании в пищу человеком, что снижает энергопотребление и стоимость подготовки [13]. В ряске отсутствуют фитиновая кислота и ингибиторы трипсина в отличие от злаковых и бобовых, которые могут снижать усвоение питательных веществ и их перевариваемость [8].

Белки рясковых, включая *L. minor*, содержат полный спектр аминокислот, необходимых человеку. Они включают все девять незаменимых аминокислот (НЗА) и соответствуют рекомендациям ВОЗ по аминокислотному составу. Содержание отдельных НЗА, таких как лейцин, фенилаланин и валин (табл. 2), у *L. minor* значительно превышает референсные значения ФАО

(Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций). Более того, содержание НЗА, особенно триптофана и ме-

тионина, в ряске в целом превосходит их уровень в нуте, кукурузе, чечевице, рисе, сое и пшенице [13].

Таблица 2

**Содержание аминокислот в *L. minor* [14]**  
**Amino acid content in *L. minor***

Аминокислота	Концентрация, г/100 г
Незаменимые	
Валин (Val)	2,664
Изолейцин (Ile)	2,043
Гистидин (His)	0,894
Лейцин (Lue)	4,132
Лизин (Lys)	2,683
Метионин (Met)	0,859
Треонин (Thr)	1,924
Триптофан (Trp)	0,365
Фенилаланин (Phe)	2,571
Заменимые	
Аланин (Ala)	2,88
Аргинин (Arg)	3,06
Аспартат (Asp)	3,71
Глицин (Gly)	2,861
Глутаминовая кислота (Glu)	6,427
Пролин (Pro)	1,248
Серин (Ser)	2,348
Тирозин (Tyr)	1,905
Цистеин (Cys)	0,381

**Углеводы.** Представители семейства *Lemnaceae* синтезируют крахмал, целлюлозу, пектин. Также были обнаружены следовые количества гемицеллюлозы и других соединений, при этом углеводный состав может варьироваться в зависимости от видов. Общее содержание углеводов внутри вида может сильно варьироваться в зависимости от условий выращивания [13, 15]. Многочисленные исследования демонстрируют значительную вариабельность в накоплении крахмала в семействе *Lemnaceae* – от 20 до 46–50 % сухой массы в зависимости от условий выращивания [15, 17, 18], а в некоторых исследованиях содержание доходило до 79,5 % [19]. В углеводном составе *L. minor* идентифицированы глюкоза, фруктоза, арабиноза, фукоза, манноза, апиоза, ксилоза, урановые кислоты, пектиновые сахара, такие как рамноза и галактоза. Также в очень малом количестве присутствовала сахароза. Помимо

этого было обнаружено, что ряска имеет низкое фукозилирование [15, 20].

Содержание целлюлозы в *L. minor* около 10 % от сухой массы, а лигнин не был обнаружен, что выгодно отличает ряску от многих наземных растений с высоким содержанием лигноцеллюлозы, упрощая ее переработку [13]. Содержание клетчатки составляет 17–23 % [21].

**Липиды.** Жиры являются важным источником энергии. Профиль жирных кислот (ЖК) в пище критически важен для здоровья человека, так как разные типы ЖК могут как защищать от сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ), так и способствовать их развитию [13].

Общей характеристикой семейства *Lemnaceae* является преобладание полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) (табл. 3) [14]. И ключевое преимущество – благоприятное соотношение омега-6/омега-3 ЖК, которое составляет менее 1,0 [13]. У *L. minor* оно составляет 0,4 [9]. Хотя оптимальным соотношением данных ЖК

для употребления считается 6 : 1 [22] или 5 : 1 [23], диета с преобладанием омега-3 кислот способствует профилактике сердечно-сосудистых заболеваний, рака и остеопороза [24]. И, напротив, при употреблении пищи с преобладанием омега-6 кислот риски возникновения данных заболеваний возрастают [25].

Среди омега-6 кислот в *L. minor* преобладает линолевая кислота (C18 : 2n-6). Кроме нее данный вид ряски содержит небольшое количество эйкозодиеновой кислоты и дигомо-γ-линоленовой кислоты. Омега-3 кислота представлена только альфа-линоленовой кислотой [9].

Среди насыщенных жирных кислот (НЖК) в *L. minor* доминирующей является пальмитиновая кислота (C16 : 0). Также были обнаружены мирисиновая, пентадециловая, стеариновая, арахидиновая, бегеновая и тетракозановая кислоты [9].

Основной мононенасыщенной жирной кислотой (МНЖК) является олеиновая кислота (C18 : 1n-9). В небольших количествах в *L. minor* также обнаружены пальмитолеиновая кислота (C16 : 1n-9 и C16 : 1n-7), гадолеиновая (C20 : 1n-9) и нервоновая кислота (C24 : 1) [9].

Таблица 3

**Содержание липидов [9]  
Lipid content [9]**

Жир	Концентрация, %
НЖК	27,99
МНЖК	4,63
ПНЖК	67,38

*L. minor* содержит группы фитостеролов: γ- и β-ситостерин, кампестерол и стигмастерол [26, 27]. γ- и β-ситостерин известны своими противодиабетическими свойствами и имеют свойство снижать уровень холестерина. Кроме этого, β-ситостерин обладает противовоспалительными, противораковыми, гепатопротекторными, антиоксидантными, кардиопротекторными свойствами [26, 28–30]. Стигмастерол является промежуточным продуктом в биосинтезе витамина D<sub>3</sub>, эстрогена, андрогенов и кортикоидов. Кампестерол и стигмастерол обладают противораковым и противовоспалительным свойствами [26].

**Биологически активные вещества.** Иммуносупрессия, индуцированная космическими факторами, например ионизирующим излучением и микрогравитацией, требует диетической коррекции [2, 31]. Рационы космонавтов должны включать не только макронутриенты, но и биологически активные соединения (БАВ): антиоксиданты, каротиноиды, фитостеролы и фенолы. В этом контексте *L. minor* представляет особый интерес как концентрированный источник БАВ.

*L. minor* является ценным источником каротиноидов. Каротиноиды, содержащиеся в *L. minor* и других представителях семейства *Lemnaceae*, играют критическую роль в защите здоровья человека в экстремальных условиях космических миссий. β-каротин (провитамин А) необходим для зрительной адаптации, что особенно

актуально при работе с приборами в условиях переменной освещенности. Лютеин и зеаксantin защищают сетчатку от фотоокислительного повреждения и поддерживают ночное зрение, а также снижают риск нейровоспалительных процессов и когнитивных нарушений. К тому же данный вид ряски имеет большое количество витамина Е и фенольных соединений [32]. В. Петрова-Ткачева и ее команда обнаружили следующие фенольные соединения: фраксетин, эскулетин, хлорогеновую кислоту, кофейную кислоту, 2,3-дигидроксибензойную кислоту, ванильную кислоту [33]. Фенолы оказывают комплексное биологическое действие: противомикробное, антимуtagenное, противовоспалительное, антиоксидантное, противораковое и другие виды активности. Каротиноиды и фенолы в комплексе могут способствовать поддержанию микробиома кишечника [32, 34].

Помимо вышеперечисленных соединений в *L. minor* были обнаружены лолиолит, аскорбиновая кислота, кампестерол, обладающие антиоксидантными свойствами. Фитол также обладает антирадикальными свойствами. Эскулин обладает широким спектром действий: антиоксидантным, антибактериальным, противовоспалительным, антигистаминным, витамин Р-подобным и антиканцерогенным [33].

Содержащийся в ряске сквален играет важную роль в организме человека, поскольку он

обладает противоопухолевой и антиоксидантной активностью [26].

*L. minor* также содержит витамины В<sub>12</sub>, В<sub>6</sub>, К<sub>1</sub> [10, 35]. Также Rodriguez J.H.V. et al. обнаружили в ней танины в количестве, безопасном для употребления человеком и животными [36].

**Минеральные элементы.** Содержание минеральных компонентов в *L. minor* зависит от

минерального состава питательной среды и уровня pH. В биомассе ряски были обнаружены необходимые для человека минеральные элементы [10, 12, 13, 37]. Примерное содержание некоторых минеральных элементов представлено в таблице 4.

Таблица 4

**Содержание минеральных элементов [10, 12, 37–39]**  
**Mineral content**

Элемент	Содержание, мг/100 г
Ca	15–32
Na	0,75–0,6
K	52
Mg	34,3–25
Fe	48,6–26
Mn	1,79–0,7
Zn	0,09–0,04
B	< 1,5
Cu	< 0,25
Cr	< 0,1
As	0,32
Cd	0,1
Pb	3
Al	15,1–13,4

**Антинутриенты.** В *L. minor* присутствуют соединения, которые могут препятствовать усвояемости и перевариванию питательных веществ: щавелевая кислота, фитиновая кислота и дубильные соединения [8]. С другой стороны, было доказано, что фитиновая кислота и дубильные вещества могут быть полезны для здоровья человека, так как они обладают антиоксидантными свойствами, пребиотическим эффектом и способны снижать риск ССЗ [25, 40].

**Использование в пищу для животных.** Интерес к использованию *L. minor* и ее экстрактов в кормопроизводстве существенно возрастает на фоне глобальной потребности в возобновляемых и дешевых источниках белка, способных снизить антропогенную нагрузку на земельные ресурсы. Данная стратегия соответствует принципам устойчивого развития и особенно актуальна для биорегенеративных систем космического назначения, где ресурсная эффективность является критическим параметром. Исследования демонстрируют перспективность включения свежей или сушеной биомассы ряски

в рационы различных организмов – от сельскохозяйственных животных до рыб [41–43].

В ряде исследований с различными видами животных и различными видами *Leptaseae* была продемонстрирована высокая усвояемость белка. Для рыб она составляла от 80 до 94 %. Для наземных домашних животных диапазон был более широкий, что, скорее всего, зависело от вида животного. Для птиц показатель усвояемости варьируется от 40 до 83 %. Для свиней в большинстве исследований приводятся значения усвояемости белка в диапазоне от 63 до 73 %, а для жвачных животных – в диапазоне от 60 до 80 % [25].

В природе различные виды рыб употребляют ряску. Во многих исследованиях *L. minor* демонстрирует высокий потенциал как кормовая добавка для рыб. Биомассой ряски можно замещать от 15 до 50 % корма в зависимости от вида рыбы. При этом наблюдалось увеличение скорости роста рыб на 15–25 %, прирост массы, а также повышение содержания белка ( $\geq 30$  %) и омега-3 ПНЖК в тканях [10, 41].

*L. minor* также хорошо показала себя в качестве добавки или частичной замены традиционных кормовых компонентов. И при соблюдении определенных пропорций, примерно до 25 % от массы корма, оптимизируется продуктивность птицы. Скармливание такого корма птице увеличивает прирост веса, увеличивает качество мяса и яиц [10, 44].

Применение *L. minor* в свиноводстве демонстрирует улучшение качества продукции: снижение жировой прослойки при увеличении выхода мяса и кожи, хотя конверсия корма сопоставима с соевым шротом и рыбной мукой. Также *L. minor* продемонстрировала хорошие показатели при ее употреблении жвачными животными, не влияя при этом на состояние здоровья животных и улучшая в некоторой степени их производительность [10, 45].

Таким образом, эти результаты указывают на потенциал *L. minor* как универсального кормового ресурса в БСЖО для животных.

**Использование в пищу для человека.** Как уже говорилось выше, ряску употребляют в пищу в некоторых странах Азии, где ее добавляют в такие блюда, как салаты, супы, карри или лепешки. Особенно это характерно для таких стран, как Лаос, Таиланд и Мьянма. Однако в западных странах ее не используют в рационе [9, 46].

Высокое содержание нутриентов и биологически активных соединений в *L. minor* делает ее перспективным компонентом рациона космонавтов для профилактики заболеваний, ассоциированных с космическим полетом: иммунных дисфункций, нейродегенеративных расстройств и нарушений циркадных ритмов [2, 32, 47]. Более того, ряску можно использовать в качестве некоторой альтернативы животному белку [9]. С другой стороны, согласно немногочисленным исследованиям, касающимся усвояемости белка ряски человеком, которые начали проводиться в последние годы, белок ряски в сравнении с молочным или гороховым усваивается хуже. Однако Т. Мюллер в своей обзорной статье отмечал, что не хватает работ, в которых бы сравнивалась усвояемость белка при различных способах обработки ряски, например свежей, сушеной или с извлеченными белками, которые были получены различными методами, а также работ, в которых бы более подробно исследовали механизмы, препятствующие усвояемости белка ряски, хотя уже были проведены некоторые исследования. Интересно, что в од-

ном из этих исследований было обнаружено, что после употребления в качестве пищи *L. minor* в крови человека был снижен уровень глюкозы и инсулина. Отсюда следует, что *L. minor* способствует контролю уровня сахара в крови [25, 48].

Было доказано, что ряска не вызывает аллергической реакции [9]. Однако недавние исследования являются достаточно спорными относительно влияния ряски на здоровье человека. Мюллер Т. приводит исследования, в которых отмечалось, что ряска при употреблении в пищу может вызывать метеоризм и запоры, хотя в других исследованиях этого не было выявлено, также различались реакции на чувство насыщения [25, 48–50].

При опрашивании потребителей о приемлемости употребления ряски в пищу было выявлено, что на нее прежде всего влияет, в каких блюдах она подается, и сенсорные характеристики [10, 25, 49, 51].

Примечательно, что интерес к ряске проявляют не только научные учреждения, но и коммерческие, в которых используют сухую и свежую ряску и ее изоляты белка в различных пищевых продуктах, тем самым повышая питательную ценность блюд. Например, ее используют такие компании, как ADGrreen, LemnaNature Aquafarms, Eat Mankai (Hinoman), GreenOnyx и Sustainable Planet [25].

**Переработка отходов или фиторемедиация.** Фиторемедиация («от греч. *phyto* – растение и *remedium* – очищающий) – это естественное и прямое использование зеленых растений для поглощения загрязняющих веществ корнями и их перемещения в верхнюю часть растения» [52]. В качестве загрязнителей могут выступать органические и неорганические вещества, которые растения извлекают из среды. Растения, способные накапливать большие концентрации загрязняющих веществ, в т. ч. и тяжелых металлов от 100 до 1000 раз, называют гипераккумуляторами. Один из методов фиторемедиации – это фитофильтрация, где водные растения используются для очистки воды [52, 53].

*L. minor* является одним из растений гипераккумуляторов, которое часто используется для очистки сточных вод. В разных исследованиях она показала, что с большой эффективностью способна поглощать органические вещества и накапливать их в питательной биомассе [41]. Например, в исследовании Моэдано Родриго

*L. minor* продемонстрировала успешное удаление в среднем 98,0 % общего азота по Кьельдалю и 98,8 % общего фосфора из сточных вод, загрязненных свинными отходами. При этом уровень кислорода в воде увеличился с 0,0 до 3,0 мг/л, и было произведено 68 т/га в год сухой биомассы с содержанием сырого протеина 35 % [54].

В Институте биофизики СО РАН были проведены эксперименты по оценке эффективности применения ряски для обработки мочи человека. В ходе исследования выяснилось, что удельная скорость роста *L. minor*, выращенной на обработанной перекисью водорода моче, была сопоставима с урожайностью в контроле (среда Кнопа) и составляла 0,25 сут<sup>-1</sup> [55].

Помимо этого *L. minor* способна накапливать различные металлы, в т. ч. тяжелые и редкоземельные, радионуклиды, промышленные ксенобиотики, что делает ее перспективной для очистки воды, но опасной для употребления. Она доказала свою эффективность в удалении отходов сельскохозяйственной промышленности, промышленности по изготовлению фармацевтических препаратов и средств личной гигиены, а также красителей и некоторых токсинов. В некоторой степени *L. minor* способна удалять наночастицы из среды, однако эффективность зависит от концентрации и видов металлов, содержащихся в частицах [56].

*L. minor* имеет сопутствующую микробиоту, часть из которой является патогенной для человека, например *Escherichia coli*, *Clostridium botulinum*, *Salmonella spp.*, микромицеты и паразитические простейшие [26, 57, 58].

**Ряска в космосе.** Благодаря своим питательным свойствам и способности перерабатывать отходы виды семейства *Lemnaceae*, особенно из рода *Lemna* и *Wolffia*, не раз рассматривались в качестве кандидата в БСЖО. В экспериментах по тестированию автономной биологической системы (АБС) *L. minor* и *Wolffia sp.* совместно с некоторыми видами беспозвоночных несколько раз летали на Shuttle-1996 (STS-77), Mir-1997 (NASA 3), Mir-1998 (NASA 6) и продемонстрировали успешную выживаемость [59, 60]. Также исследование Yuan et al. [1] с *Lemna aequinoctialis* и *Wolffia globosa* показало, что в условиях имитационной микрогравитации не угнетают рост, а в ряде случаев даже стимулируют его (увеличивая относительную скорость роста), одновременно способствуя накоплению крахмала в некоторых видах семейства

*Lemnaceae*. Однако в исследовании Eichhorn M. *Lemna trisulca* в открытом космосе на борту космического корабля Endeavour (STS-67) [61] показала противоположную тенденцию в накоплении крахмала, при этом наблюдалось увеличение осмиофильных частиц в сравнении с земным контролем. Это свидетельствует о хорошем адаптационном потенциале видов данного семейства.

**Заключение.** *L. minor* имеет большое количество белка, достигающего 45 % сухой биомассы, с высоким содержанием НЗА, таких как лейцин, фенилаланин и валин, количество которых значительно превышает референсные значения ФАО. Содержание углеводов варьируется от 1 до 3 % сырой биомассы, а липидов – от 0,2 до 0,6 % с преобладанием ПНЖК. *L. minor* богата витаминами и минералами. В различных исследованиях было показано, что при добавлении *L. minor* в рацион животных она не только хорошо усваивается, но и улучшает производственные характеристики и положительно влияет на здоровье животного. В ряде исследований было показано, что биомасса ряски полностью съедобна и гипоаллергенна для человека. Однако некоторые вопросы, связанные с употреблением и влиянием на здоровье, остаются открытыми.

Благодаря способности удалять из среды различного рода загрязнения, *L. minor* может использоваться для ремедиации аквакультур. Также она является растением-гипераккумулятором и демонстрирует высокую эффективность поглощения органических и неорганических веществ, преобразуя их в питательную биомассу, которую рыбы могут употреблять в пищу.

Эксперименты по выращиванию в условиях космоса *L. minor* и других представителей семейства *Lemnaceae* подтвердили их успешную выживаемость.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что ряска является перспективным кандидатом в биологические системы жизнеобеспечения (БСЖО). Благодаря своей способности конвертировать продукты метаболизма человека в питательную биомассу, а также уменьшать содержание CO<sub>2</sub> в воздухе, она может повысить замкнутость системы жизнеобеспечения. Питательную биомассу можно использовать в качестве добавки для человека или корма для животных, которые будут выращиваться в БСЖО.

В Институте биофизики СО РАН разрабатываются экспериментальные модели систем жизнеобеспечения космического и земного назначения. Важное направление, которому уделяется внимание, – это переработка отходов жизнедеятельности человека для их включения в замкнутый цикл в БСЖО. Одним из вариантов рассматривается использование аквакультуры. После переработки отходы жизнедеятельности человека вносятся в почвоподобный субстрат как жидкие удобрения для растений. Дренажная вода из-под растений направляется в модуль с аквакультурой *L. minor* и рыбами (гуппи). Ее избыток поступает в водоем *Dunallia salina* и

*Artemia salina*, где концентрируются элементы питательной среды и происходит накопление NaCl. В последующем биомассу водорослей и гетеротрофных организмов планируется использовать в качестве корма для животных и пищевых добавок для человека. И, помимо этого, накопленную NaCl из водоема с *Dunallia salina* можно извлекать и добавлять в рацион человека. Таким образом, аквакультура дает возможность перерабатывать продукты жизнедеятельности в полноценный животный белок и другие эссенциальные нутриенты, а также осуществлять круговорот соли NaCl в БСЖО.

#### Список источников

1. Yuan J., Xu K. Effects of simulated microgravity on the performance of the duckweeds *Lemna aequinoctialis* and *Wolffia globosa* // *Aquatic Botany*. 2017. Vol. 137. P. 65–71. DOI: 10.1016/j.aquabot.2016.11.010. EDN: XZOJUX.
2. Mapstone L.J., Leite M.N., Purton S. et al. Cyanobacteria and microalgae in supporting human habitation on Mars // *Biotechnology Advances*. 2022. Vol. 59. P. 107946. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2022.107946. EDN: CXJJMV.
3. Escobar C., Escobar A. Duckweed: A tiny aquatic plant with enormous potential for bioregenerative life support systems. In: 47th international conference on environmental systems; 16–20 Jul 2017; Charleston, South Carolina. ICES: Summer; 2017. P. 281.
4. Дорофеева А.С. Система обращения с отходами в Арктической зоне и районах Крайнего Севера // *Новизна. Эксперимент. Традиции*. 2022. Т. 8. № 2. С. 21–27. EDN: JJGZET.
5. Маркин И.В., Щелканова Е.С., Володяшкин Р.А., и др. Перспективы создания автономных комплексов жизнеобеспечения с использованием биологических // *Медицина катастроф*. 2021. № 3. С. 73–80. DOI: 10.33266/2070-1004-2021-3-73-80. EDN: DALNWY.
6. Song Y., Hu Z., Liu S., et al. Utilization of Microalgae and Duckweed as Sustainable Protein Sources for Food and Feed: Nutritional Potential and Functional Applications // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2025. Vol. 73, N 8. P. 4466–4482. DOI: 10.1021/acs.jafc.4c11610. EDN: JIBPOW.
7. Appenroth K.J., Sree K.S., Böhm V., et al. Nutritional value of duckweeds (*Lemnaceae*) as human food // *Food chemistry*. 2017. Vol. 217. P. 266–273.
8. Stomp A.M. The duckweeds: a valuable plant for biomanufacturing // *Biotechnology annual review*. 2005. Vol. 11. P. 69–99. DOI: 10.1016/S1387-2656(05)11002-3. EDN: XSNVNS.
9. Jaimes Prada O., Lora Díaz O., Tache Rocha K. Lenteja de agua (*Lemna minor*): potencial alimentario y ambiental. Revisión // *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2024. Vol. 15, N 2. P. 404–424. DOI: 10.22319/rmcp.v15i2.6107. EDN: HEMPCM.
10. Sosa D., Alves F.M., Prieto M.A., et al. *Lemna minor*: Unlocking the value of this duckweed for the food and feed industry // *Foods*. 2024. Vol. 13, N 10. P. 1435. DOI: 10.3390/foods13101435. EDN: HNXRYO.
11. Turck D., Bohn T., et al. EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). Safety of *Lemna minor* and *Lemna gibba* whole plant material as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283 // *EFSA Journal*. 2022. Vol. 20, N 11. P. e07598.1.
12. Ullah H., Gul B., Khan H., et al. Effect of growth medium nitrogen and phosphorus on nutritional composition of *Lemna minor* (an alternative fish and poultry feed) // *BMC Plant Biology*. 2022. Vol. 22, N 1. P. 214. DOI: 10.1186/s12870-022-03600-1. EDN: ZJOIDL.
13. Xu J., Shen Y., Zheng Y. et al. Duckweed (*Lemnaceae*) for potentially nutritious human food: A review // *Food Reviews International*. 2023. Vol. 39, N 7. P. 3620–3634. DOI: 10.1080/87559129.2021.2012800. EDN: ZBKPSK.

14. Chakrabarti R., Clark W.D., Sharma J.G., et al. Mass production of *Lemna minor* and its amino acid and fatty acid profiles // *Frontiers in chemistry*. 2018. Vol. 6. P. 479.
15. Никифоров Л.А., Кривошеков С.В., Лигачева А.А., и др. Сравнительная химическая характеристика водорастворимых полисахаридов ряски малой (*Lemna minor* L.), ряски трехдольной (*Lemna trisulca* L.) и ряски многокоренной (*Lemna polyrrhiza* L.) и их влияние на функциональную активность клеток иммунной системы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2020. № 3. С. 63–71. EDN: SHIJNX.
16. Zhao X., Moates G.K., Wellner N., et al. Chemical characterisation and analysis of the cell wall polysaccharides of duckweed (*Lemna minor*) // *Carbohydrate polymers*. 2014. Vol. 111. P. 410–418. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.04.079. EDN: UUMMSH.
17. Sree K.S., Appenroth K.J. Starch accumulation in duckweeds (*Lemnaceae*) induced by nutrient deficiency // *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2022. Vol. 34, N 3. P. 204–212. DOI: 10.9755/ejfa.2022.v34.i3.2846. EDN: ITESLC.
18. Appenroth K.J., Ziegler P., Sree K.S. Accumulation of starch in duckweeds (*Lemnaceae*), potential energy plants // *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2021. Vol. 27, N 11. P. 2621–2633. DOI: 10.1007/s12298-021-01100-4. EDN: LXGWGX.
19. de Souza Moretti M.M., Yu W., Zou W., et al. Relationship between the molecular structure of duckweed starch and its in vitro enzymatic degradation kinetics // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 139. P. 244–251.
20. Pagliuso D., Grandis A., Fortirer J.S., et al. Duckweeds as promising food feedstocks globally // *Agronomy*. 2022. Vol. 12, N 4. P. 796. DOI: 10.3390/agronomy12040796. EDN: ZKQIRZ.
21. Климова Е.В. Исследование химического состава ряски малой (*Lemna minor*) и перспективы использования в пищевой промышленности // *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*. 2015. № 6. С. 3–7. EDN: VBIVAD.
22. Wijendran V., Hayes K.C. Dietary n-6 and n-3 fatty acid balance and cardiovascular health // *Annu. Rev. Nutr.* 2004. Vol. 24, N 1. P. 597–615.
23. Joint F.A.O., Consultation W.H.O.E. Fats and fatty acids in human nutrition // *Report of an expert consultation*. 2008. Vol. 10, N 14. P. 155–183.
24. Simopoulos A.P. Evolutionary aspects of diet, the omega-6/omega-3 ratio and genetic variation: nutritional implications for chronic diseases // *Biomedicine & pharmacotherapy*. 2006. Vol. 60, N 9. P. 502–507.
25. Muller T., Cournoyer A., Bazinet L. Emerging potentials of duckweed (*Lemnaceae*): From composition to protein uses in food and nutraceuticals—A review // *Food Research International*. 2025. Vol. 219. P. 116777. DOI: 10.1016/j.foodres.2025.116777. EDN: HQRJLB.
26. Yahaya N., Hamdan N.H., Zabidi A.R., et al. Duckweed as a future food: Evidence from metabolite profile, nutritional and microbial analyses // *Future Foods*. 2022. Vol. 5. P. 100128. DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100128. EDN: KSZTJS.
27. Kim Y., Hyun S.H., Park H.E., et al. Metabolic profiling, free-radical scavenging and tyrosinase inhibitory activities of *Lemna minor* whole plants cultivated in various concentrations of proline and sucrose // *Process Biochemistry*. 2012. Vol. 47, N 1. P. 62–68. DOI: 10.1016/j.procbio.2011.10.010. EDN: PMCUMN.
28. Balamurugan R., Duraipandiyan V., Ignacimuthu S. Antidiabetic activity of  $\gamma$ -sitosterol isolated from *Lippia nodiflora* L. in streptozotocin induced diabetic rats // *European journal of pharmacology*. 2011. Vol. 667, N 1-3. P. 410–418.
29. Leverton R.M. Hypocholesteremic effect of sitosterol // *Nutrition reviews*. 1964. Vol. 22. P. 326–328.
30. Khan Z., Nath N., Rauf A., et al. Multifunctional roles and pharmacological potential of  $\beta$ -sitosterol: Emerging evidence toward clinical applications // *Chemico-biological interactions*. 2022. Vol. 365. P. 110117. DOI: 10.1016/j.cbi.2022.110117. EDN: KKBCZO.
31. Kast J., Yu Y., Seubert C.N., et al. Drugs in space: pharmacokinetics and pharmacodynamics in astronauts // *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2017. Vol. 109. P. S2–S8. DOI: 10.1016/j.ejps.2017.05.025. EDN: SVQRHF.
32. López-Pozo M., Adams III W.W., McNamara M., et al. A preharvest finishing procedure for *Lemna* to produce high levels of zeaxanthin that is retained post-high-light exposure // *Future Foods*. 2024. Vol. 10. P. 100517. DOI: 10.1016/j.fufo.2024.100517. EDN: RSFWCD.

33. Petrova-Tacheva V., Ivanov V., Atanasov A. *Lemna minor* L. as a source of antioxidants // *Trakia Journal of Sciences*. 2020. Vol. 18, N 1. P. 157–162. DOI: 10.15547/tjs.2020.s.01.029. EDN: VWRJJY.
34. Rashmi H.B., Negi P.S. Phenolic acids from vegetables: A review on processing stability and health benefits // *Food Research International*. 2020. Vol. 136. P. 109298. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109298. EDN: CTSQLV.
35. Acosta K., Sree K.S., Okamoto N., et al. Source of Vitamin B<sub>12</sub> in plants of the Lemnaceae family and its production by duckweed-associated bacteria // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2024. Vol. 135. P. 106603. DOI: 10.1016/j.jfca.2024.106603. EDN: CRXLTG.
36. Rodriguez J.H.V., Gavin-Moyano C., Aveiga M.R.V., et al. Chemical study of the macrophyte duckweed (*Lemna minor* L.) // *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 2025. Vol. 42, N 1. P. e254202.
37. Ullah H., Gul B., Khan H., et al. Effect of salt stress on proximate composition of duckweed (*Lemna minor* L.) // *Heliyon*. 2021. Vol. 7, N 6. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07399. EDN: EKGCOZ.
38. Devlamynck R., de Souza M.F., Leenknecht J., et al. *Lemna minor* cultivation for treating swine manure and providing micronutrients for animal feed // *Plants*. 2021. Vol. 10, N 6. P. 1124. DOI: 10.3390/plants10061124. EDN: AFDXYE.
39. Sońta M., Więcek J., Szara E., et al. Quantitative and qualitative traits of duckweed (*Lemna minor*) produced on growth media with pig slurry // *Agronomy*. 2023. Vol. 13, N 7. P. 1951. DOI: 10.3390/agronomy13071951. EDN: ZGDBQH.
40. Petroski W., Minich D.M. Is there such a thing as "anti-nutrients"? A narrative review of perceived problematic plant compounds // *Nutrients*. 2020. Vol. 12, N 10. P. 2929. DOI: 10.3390/nu12102929. EDN: ISQLGA.
41. Ujong A., Naibaho J., Ghalamara S., et al. Duckweed: exploring its farm-to-fork potential for food production and biorefineries // *Sustainable Food Technology*. 2025. Vol. 3, N 1. P. 54–80.
42. Culley J.D.D., Epps E.A. Use of duckweed for waste treatment and animal feed // *Water Pollution Control Federation*. 1973. Vol. 45, N 2. P. 337–347.
43. Cheng J.J., Stomp A.M. Growing duckweed to recover nutrients from wastewaters and for production of fuel ethanol and animal feed // *Clean-Soil, Air, Water*. 2009. Vol. 37, N 1. P. 17–26.
44. Leng R.A., Stambolie J.H., Bell R. Duckweed—a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish // *Livestock Research for Rural Development*. 1995. Vol. 7, N 1. P. 36.
45. Sońta M., Rekiel A., Batorska M. Use of duckweed (*Lemna* L.) in sustainable livestock production and aquaculture—a review // *Annals of Animal Science*. 2019. Vol. 19, N 2. P. 257–271. DOI: 10.2478/aoas-2018-0048. EDN: XWEJEX.
46. Appenroth K.J., Sree K.S., Bog M., et al. Nutritional value of the duckweed species of the genus *Wolffia* (*Lemnaceae*) as human food // *Frontiers in chemistry*. 2018. Vol. 6. P. 483. DOI: 10.3389/fchem.2018.00483. EDN: YILUJZ.
47. Crucian B., Babiak-Vazquez A., Johnston S., et al. Incidence of clinical symptoms during long-duration orbital spaceflight // *International journal of general medicine*. 2016. Vol. 9. P. 383–391. DOI: 10.2147/IJGM.S114188. EDN: XUUCWR.
48. Zeinstra G.G., Somhorst D., Oosterink E., et al. Postprandial amino acid, glucose and insulin responses among healthy adults after a single intake of *Lemna minor* in comparison with green peas: a randomised trial // *Journal of nutritional science*. 2019. Vol. 8. P. e28.
49. Mes J.J., Esser D., Somhorst D., et al. Daily intake of *Lemna minor* or spinach as vegetable does not show significant difference on health parameters and taste preference // *Plant Foods for Human Nutrition*. 2022. Vol. 77, N 1. P. 121–127. DOI: 10.1007/s11130-022-00952-9. EDN: BDCYHW.
50. Mes J.J., Esser D., Oosterink E., et al. A controlled human intervention trial to study protein quality by amino acid uptake kinetics with the novel *Lemna* protein concentrate as case study // *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 2022. Vol. 73, N 2. P. 251–262. DOI: 10.1080/09637486.2021.1960958. EDN: CBQHOS.
51. De Beukelaar M.F.A., Zeinstra G.G., Mes J.J., et al. Duckweed as human food. The influence of meal context and information on duckweed acceptability of Dutch consumers // *Food quality and preference*. 2019. Vol. 71. P. 76–86.

52. Rezania S., Taib S.M., Din M.F.M., et al. Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater // *Journal of hazardous materials*. 2016. Vol. 318. P. 587–599. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.07.053. EDN: WSCOYT.
53. Sheoran V., Sheoran A.S., Poonia P. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 41, N 2. P. 168–214.
54. Mohedano R.A., Costa R.H.R., Tavares F.A., et al. High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds // *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 112. P. 98–104.
55. Manukovsky N., Kovalev V. Application of duckweed for human urine treatment in Bioregenerative Life Support System. In: 40th COSPAR Scientific Assembly. 2–10 Aug 2014. Moscow, 2014.
56. Ekperusi A.O., Sikoki F.D., Nwachukwu E.O. Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective // *Chemosphere*. 2019. Vol. 223. P. 285–309. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.025. EDN: CLYQRW.
57. Okwuosa O.B., Eyo J., Amadi-Ibiam C.O. Growth and Nutritional profile of Duckweed (*Lemna minor*) cultured with different organic manure // *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2021. Vol. 8, N 12. P. 7–11.
58. Gjata I., Tommasi F., De Leonardis S., et al. Rare earth elements affect the growth and fitness of free-floating plant *Lemna minor* L // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. P. 1540266. DOI: 10.3389/fpls.2025.1540266. EDN: FJMGXP.
59. MacCallum T.K., Anderson G.A., Poynter J.E., et al. The ABS (Autonomous Biological System): Spaceflight results from a bioregenerative closed life support system // *SAE Technical Paper*. 2000. N 2000-01-2340.
60. Poynter J., MacCallum T.K., Anderson G.A., et al. The development and testing of visualization and passively controlled life support systems for experimental organisms during spaceflight // *SAE Technical Paper*. 2001. N 2001-01-2288.
61. Eichhorn M., Fritsche C. Effects of Space Shuttle Mission STS-67 on Cell Structure in *Lemna trisulca* // *Space Station Utilisation*. 1996. Vol. 385. P. 137.

### References

1. Yuan J, Xu K. Effects of simulated microgravity on the performance of the duckweeds *Lemna aequinoctialis* and *Wolffia globosa*. *Aquatic Botany*. 2017;137:65-71. DOI: 10.1016/j.aquabot.2016.11.010.
2. Mapstone LJ, Leite MN, Purton S, et al. Cyanobacteria and microalgae in supporting human habitation on Mars. *Biotechnology Advances*. 2022;59:107946. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2022.107946.
3. Escobar C, Escobar A. Duckweed: A tiny aquatic plant with enormous potential for bioregenerative life support systems. In: *47th international conference on environmental systems; 16–20 Jul 2017; Charleston, South Carolina*. ICES: Summer; 2017. P. 281.
4. Dorofeeva AS. Waste Management System in the Arctic Zone and Regions of the Far North. *Novelty. Experiment. Traditions*. 2022;8(2):21-7. (In Russ.).
5. Markin IV, Shchelkanova ES, Volodyashkin RA, et al. Prospects for creation of autonomous life support complexes using biological systems for arctic and far north conditions. *Disaster Medicine*. 2021;(3):73-80. (In Russ.). DOI: 10.33266/2070-1004-2021-3-73-80.
6. Song Y, Hu Z, Liu S, et al. Utilization of Microalgae and Duckweed as Sustainable Protein Sources for Food and Feed: Nutritional Potential and Functional Applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2025;73(8):4466-82. DOI: 10.1021/acs.jafc.4c11610.
7. Appenroth KJ, Sree KS, Böhm V, et al. Nutritional value of duckweeds (*Lemnaceae*) as human food. *Food chemistry*. 2017;217:266-73. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.08.116.
8. Stomp AM. The duckweeds: a valuable plant for biomanufacturing. *Biotechnology annual review*. 2005;11:69-99. DOI: 10.1016/S1387-2656(05)11002-3.
9. Jaimes Prada O, Lora Díaz O, Tache Rocha K. Lenteja de agua (*Lemna minor*): potencial alimentario y ambiental. *Revisión. Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 2024;15(2):404-24. DOI: 10.22319/rmcp.v15i2.6107.

10. Sosa D, Alves FM, Prieto MA, et al. Lemna minor: Unlocking the value of this duckweed for the food and feed industry. *Foods*. 2024;13(10):1435. DOI: 10.3390/foods13101435.
11. Turck D, Bohn T, et al. EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). Safety of *Lemna minor* and *Lemna gibba* whole plant material as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*. 2022;20(11):e07598.1. DOI: 10.2903/j.efsa.2022.7598.
12. Ullah H, Gul B, Khan H, et al. Effect of growth medium nitrogen and phosphorus on nutritional composition of *Lemna minor* (an alternative fish and poultry feed). *BMC Plant Biology*. 2022;22(1):214. DOI: 10.1186/s12870-022-03600-1.
13. Xu J, Shen Y, Zheng Y, et al. Duckweed (*Lemnaceae*) for potentially nutritious human food: A review. *Food Reviews International*. 2023;39(7):3620-34. DOI: 10.1080/87559129.2021.2012800.
14. Chakrabarti R, Clark WD, Sharma JG, et al. Mass production of *Lemna minor* and its amino acid and fatty acid profiles. *Frontiers in chemistry*. 2018;6:479. DOI: 10.3389/fchem.2018.00479.
15. Nikiforov LA, Krivoshchekov SV, Ligacheva AA, et al. Chemical characteristics of water-soluble polysaccharides of *Lemna minor* L., *Lemna trisulca* L. and *Lemna polyrhiza* L. and their influence on the functional activity of cells of the immune system. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2020;(3):63-71. (In Russ.).
16. Zhao X, Moates GK, Wellner N, et al. Chemical characterisation and analysis of the cell wall polysaccharides of duckweed (*Lemna minor*). *Carbohydrate polymers*. 2014;111:410-18. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.04.079.
17. Sree KS, Appenroth KJ. Starch accumulation in duckweeds (*Lemnaceae*) induced by nutrient deficiency. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2022;34(3):204-12. DOI: 10.9755/ejfa.2022.v34.i3.2846.
18. Appenroth KJ, Ziegler P, Sree KS. Accumulation of starch in duckweeds (*Lemnaceae*), potential energy plants. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2021;27(11):2621-2633. DOI: 10.1007/s12298-021-01100-4.
19. de Souza Moretti MM, Yu W, Zou W, et al. Relationship between the molecular structure of duckweed starch and its in vitro enzymatic degradation kinetics. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019;139:244-51. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.07.206.
20. Pagliuso D, Grandis A, Fortirer JS, et al. Duckweeds as promising food feedstocks globally. *Agronomy*. 2022;12(4):796. DOI: 10.3390/agronomy12040796.
21. Klimova EV. Research of the chemical composition of the duckweed of small (*Lemna minor*) and prospect of use in the food industry. *Technology and the study of merchandise of innovative foodsuffs*. 2015;(6):3-7. (In Russ.).
22. Wijendran V, Hayes KC. Dietary n-6 and n-3 fatty acid balance and cardiovascular health. *Annu. Rev. Nutr.* 2004;24(1):597-615. DOI: 10.1146/annurev.nutr.24.012003.132106.
23. Joint F.A.O., Consultation W.H.O.E. Fats and fatty acids in human nutrition. Report of an expert consultation. 2008;10(14):155-83.
24. Simopoulos AP. Evolutionary aspects of diet, the omega-6/omega-3 ratio and genetic variation: nutritional implications for chronic diseases. *Biomedicine & pharmacotherapy*. 2006;60(9):502-07. DOI: 10.1016/j.biopha.2006.07.080.
25. Muller T, Cournoyer A, Bazinet L. Emerging potentials of duckweed (*Lemnaceae*): From composition to protein uses in food and nutraceuticals—A review. *Food Research International*. 2025;219:116777. DOI: 10.1016/j.foodres.2025.116777.
26. Yahaya N, Hamdan NH, Zabidi AR, et al. Duckweed as a future food: Evidence from metabolite profile, nutritional and microbial analyses. *Future Foods*. 2022;5:100128. DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100128.
27. Kim Y, Hyun S.H, Park HE, et al. Metabolic profiling, free-radical scavenging and tyrosinase inhibitory activities of *Lemna minor* whole plants cultivated in various concentrations of proline and sucrose. *Process Biochemistry*. 2012;47(1):62-68. DOI: 10.1016/j.procbio.2011.10.010.
28. Balamurugan R, Durairandiyan V, Ignacimuthu S. Antidiabetic activity of  $\gamma$ -sitosterol isolated from *Lippia nodiflora* L. in streptozotocin induced diabetic rats. *European journal of pharmacology*. 2011;667(1-3):410-18. DOI: 10.1016/j.ejphar.2011.05.025.
29. Leverton RM. Hypocholesteremic effect of sitosterol. *Nutrition reviews*. 1964;22:326-8. DOI: 10.1111/j.1753-4887.1964.tb04830.x.

30. Khan Z, Nath N, Rauf A, et al. Multifunctional roles and pharmacological potential of  $\beta$ -sitosterol: Emerging evidence toward clinical applications. *Chemico-biological interactions*. 2022;365:110117. DOI: 10.1016/j.cbi.2022.110117.
31. Kast J, Yu Y, Seubert CN, et al. Drugs in space: pharmacokinetics and pharmacodynamics in astronauts. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2017;109:S2-8. DOI: 10.1016/j.ejps.2017.05.025.
32. López-Pozo M, Adams III WW, McNamara M, et al. A preharvest finishing procedure for *Lemna* to produce high levels of zeaxanthin that is retained post-high-light exposure. *Future Foods*. 2024;10:100517. DOI: 10.1016/j.fufo.2024.100517.
33. Petrova-Tacheva V, Ivanov V, Atanasov A. *Lemna minor* L. as a source of antioxidants. *Trakia Journal of Sciences*. 2020; 18(1):157-62. DOI: 10.15547/tjs.2020.s.01.029.
34. Rashmi HB, Negi PS. Phenolic acids from vegetables: A review on processing stability and health benefits. *Food Research International*. 2020;136:109298. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109298.
35. Acosta K, Sree KS, Okamoto N, et al. Source of Vitamin B<sub>12</sub> in plants of the Lemnaceae family and its production by duckweed-associated bacteria. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2024;135:106603. DOI: 10.1016/j.jfca.2024.106603.
36. Rodriguez JHV, Gavin-Moyano C, Aveiga MRV, et al. Chemical study of the macrophyte duckweed (*Lemna minor* L.). *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*. 2025,42(1):e254202. DOI: 10.47280/RevFacAgron(LUZ).v42.n1.II.
37. Ullah H, Gul B., Khan H, et al. Effect of salt stress on proximate composition of duckweed (*Lemna minor* L.). *Heliyon*. 2021;7(6):e07399. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07399.
38. Devlamynck R, de Souza MF, Leenknecht J, et al. Lemna minor cultivation for treating swine manure and providing micronutrients for animal feed. *Plants*. 2021;10(6):1124. DOI: 10.3390/plants10061124.
39. Soñta M, Więcek J, Szara E, et al. Quantitative and qualitative traits of duckweed (*Lemna minor*) produced on growth media with pig slurry. *Agronomy*. 2023;13(7):1951. DOI: 10.3390/agronomy13071951.
40. Petroski W, Minich DM. Is there such a thing as “anti-nutrients”? A narrative review of perceived problematic plant compounds. *Nutrients*. 2020;12(10):2929. DOI: 10.3390/nu12102929.
41. Ujong A, Naibaho J, Ghalamara S, et al. Duckweed: exploring its farm-to-fork potential for food production and biorefineries. *Sustainable Food Technology*. 2025;3(1):54-80. DOI: 10.1039/D4FB00288A.
42. Culley JDD, Epps EA. Use of duckweed for waste treatment and animal feed. *Water Pollution Control Federation*. 1973;45(2):337-47.
43. Cheng JJ, Stomp AM. Growing duckweed to recover nutrients from wastewaters and for production of fuel ethanol and animal feed. *Clean–Soil, Air, Water*. 2009;37(1):17-26. DOI: 10.1002/clen.200800210.
44. Leng RA, Stambolie JH, Bell R. Duckweed—a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. *Livestock Research for Rural Development*. 1995;7(1):36.
45. Soñta M, Rekiel, Batorska M. Use of duckweed (*Lemna* L.) in sustainable livestock production and aquaculture – a review. *Annals of Animal Science*. 2019;19(2):257-71. DOI: 10.2478/aoas-2018-0048.
46. Appenroth KJ, Sree KS, Bog M, et al. Nutritional value of the duckweed species of the genus *Wolffia* (*Lemnaceae*) as human food. *Frontiers in chemistry*. 2018;6:483. DOI: 10.3389/fchem.2018.00483.
47. Crucian B, Babiak-Vazquez A, Johnston S, et al. Incidence of clinical symptoms during long-duration orbital spaceflight. *International journal of general medicine*. 2016;9:383-91. DOI: 10.2147/IJGM.S114188.
48. Zeinstra GG, Somhorst D, Oosterink E, et al. Postprandial amino acid, glucose and insulin responses among healthy adults after a single intake of *Lemna minor* in comparison with green peas: a randomised trial. *Journal of nutritional science*. 2019;8:e28. DOI: 10.1017/jns.2019.26.
49. Mes JJ, Esser D, Somhorst D, et al. Daily intake of *Lemna minor* or spinach as vegetable does not show significant difference on health parameters and taste preference. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2022;77(1):121-7. DOI: 10.1007/s11130-022-00952-9.
50. Mes JJ, Esser D, Oosterink E, et al. A controlled human intervention trial to study protein quality by amino acid uptake kinetics with the novel *Lemna* protein concentrate as case study. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*. 2022;73(2):251-62. DOI: 10.1080/09637486.2021.1960958.
51. De Beukelaar MFA, Zeinstra GG, Mes JJ, et al. Duckweed as human food. The influence of meal context and information on duckweed acceptability of Dutch consumers. *Food quality and preference*. 2019;71:76-86. DOI: 10.1016/j.foodqual.2018.06.005.

52. Rezania S, Taib SM, Din MFM, et al. Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of hazardous materials*. 2016;318:587-99. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.07.053.
53. Sheoran V, Sheoran AS, Poonia P. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2010;41(2):168-214. DOI: 10.1080/10643380902718418.
54. Mohedano RA, Costa RHR, Tavares FA, et al. High nutrient removal rate from swine wastes and protein biomass production by full-scale duckweed ponds. *Bioresource Technology*. 2012;112:98-104. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.083.
55. Manukovsky N, Kovalev V. Application of duckweed for human urine treatment in Bioregenerative Life Support System. In: *40th COSPAR Scientific Assembly. 2–10 Aug 2014*. Moscow; 2014.
56. Ekperusi AO, Sikoki FD, Nwachukwu EO. Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. *Chemosphere*. 2019;223:285-309. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.025.
57. Okwuosa OB, Eyo J, Amadi-Ibiam CO. Growth and Nutritional profile of Duckweed (*Lemna minor*) cultured with different organic manure. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2021;8(12):7-11. DOI: 10.17148/IARJSET.2021.81202.
58. Gjata I, Tommasi F, De Leonardis S, et al. Rare earth elements affect the growth and fitness of free-floating plant *Lemna minor* L. *Frontiers in Plant Science*. 2025;16:1540266. DOI: 10.3389/fpls.2025.1540266.
59. MacCallum TK, Anderson GA, Poynter JE, et al. The ABS (Autonomous Biological System): Spaceflight results from a bioregenerative closed life support system. *SAE Technical Paper*. 2000;(2000-01-2340). DOI: 10.4271/2000-01-2340.
60. Poynter J, MacCallum TK, Anderson GA, et al. The development and testing of visualization and passively controlled life support systems for experimental organisms during spaceflight. *SAE Technical Paper*. 2001;(2001-01-2288). DOI: 10.4271/2001-01-2288.
61. Eichhorn M, Fritsche C. Effects of Space Shuttle Mission STS-67 on Cell Structure in *Lemna trisulca*. *Space Station Utilisation*. 1996;385:137.

Статья принята к публикации 05.03.2026 / The article accepted for publication 05.03.2026

Информация об авторах:

**Ольга Вячеславовна Щепетнева**, младший научный сотрудник лаборатории проблем создания круговоротных процессов искусственных экосистем, аспирант

**Софья Кирилловна Митрофанова**, младший научный сотрудник лаборатории проблем создания круговоротных процессов искусственных экосистем

**Сергей Викторович Трифонов**, заведующий лабораторией проблем создания круговоротных процессов искусственных экосистем, кандидат биологических наук

**Николай Сергеевич Мануковский**, младший научный сотрудник лаборатории проблем создания круговоротных процессов искусственных экосистем, кандидат биологических наук

Information about the authors:

**Olga Vyacheslavovna Shchepetneva**, Junior Researcher, Laboratory for the Development of Circular Processes in Artificial Ecosystems, Postgraduate student

**Sofya Kirillovna Mitrofanova**, Junior Researcher, Laboratory for the Development of Circular Processes in Artificial Ecosystems

**Sergey Viktorovich Trifonov**, Head of the Laboratory for the Development of Circular Processes in Artificial Ecosystems, Candidate of Biological Sciences

**Nikolay Sergeevich Manukovsky**, Junior Researcher, Laboratory for the Development of Circular Processes in Artificial Ecosystems, Candidate of Biological Sciences