DOI 10.69540/2949-4079.2025.35.48.003 **УДК 66.011**

О.С. Восканян, А.А. Павлова
O.S. Voskanyan, A.A. Pavlova

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОСЛЕЙ В КАЧЕСТВЕ ПРОТЕИНСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

POTENTIAL APPLICATIONS OF ALGAE AS A SOURCE OF PROTEIN

Аннотация:

Рост населения планеты, климатические изменения, техногенные загрязнения и урбанизация представляют угрозу для устойчивого питания человечества. Угроза продовольственной безопасности, в частности, усугубляющийся дефицит пищевого белка, вынуждает искать альтернативные источники протеинсодержащего сырья. Проанализированы известные традиционные (животный белок) и альтернативные (растительный белок, белок насекомых) источники белка, сопоставлены их скорректированный аминокислотный коэффициент усвояемости белка (PDCAAS) и аминокислотный скор с поправкой на усвояемость незаменимых аминокислот (DIAAS). В связи с сокращением посевных площадей РФ на 29,8 % необходима замена традиционных и альтернативных источников белка, производство которых эксплуатирует земельные и водные ресурсы. В качестве перспективного протеинсодержащего сырья, которое не только положительно влияет на окружающую среду и поддерживает биоразнообразие флоры и фауны, а также устойчиво в климатических, сельскохозяйственных и экономических условиях России, предложены водоросли — макрофиты (до 47,5 % белка в сухой массе) и микроводоросли (до 70 % белка в сухой массе). Потенциал альгофлоры раскрыт на примере микроводорослей: рассмотрены особенности их химического состава, способы культивации и нюансы извлечения микроводорослевого белка.

Ключевые слова: дефицит пищевого белка, альтернативные белки, водоросли, микроводоросли, технологии.

Abstract:

Global population growth, climate change, man-made pollution and urbanization pose a threat to the sustainable nutrition of mankind. The threat to the food security of the world's population, in particular the worsening shortage of dietary protein, forces us to look for alternative sources of protein-containing raw materials. The well-known traditional (animal protein) and alternative (vegetable protein, insect protein) protein sources were analyzed, and their adjusted amino acid protein digestibility coefficient (PDCAAS)

and amino acid score adjusted for the digestibility of essential amino acids (DIAAS) were compared. Due to a 29,8 % reduction in the acreage of the Russian Federation, it is necessary to replace traditional and alternative protein sources, the production of which exploits land and water resources. Macrophyte algae (up to 47,5 % protein in dry weight) are proposed as a promising protein-containing raw material that not only has a positive effect on the environment and supports the biodiversity of flora and fauna, but is also stable in the climatic, agricultural and economic conditions of the Russia and microalgae (up to 70 % protein in dry weight). The potential of algoflora is revealed by the example of microalgae: the features of their chemical composition, cultivation methods and nuances of extraction of microalgae protein are considered.

Keywords: dietary protein deficiency, alternative proteins, algae, microalgae, technologies.

В настоящее время в мире возник и усугубляется дефицит пищевого белка: при суточной норме белка 69—100 г на человека приходится 60 г. В РФ по данным «ФИЦ питания, биотехнологии и безопасности пищи» дефицит пищевого белка составляет 25—30 %, т. е. 1 млн т ежегодно. Белки и незаменимые аминокислоты являются важными структурными и функциональными компонентами, участвующими во многих метаболических процессах организма человека, их недостаток сказывается на работоспособности и здоровье человека: ведет к нарушению деятельности желез внутренней секреции, вызывает сердечно-сосудистые заболевания, изменяет гормональный фон и снижает иммунитет[27].

Не утешают и прогнозы Продовольственной и сельскохозяйственной организации объединенных наций (ФАО): к 2050 г. численность населения планеты увеличится до 9,7 млрд человек, 70 % из них будут составлять городские жители[28]. Глобальная урбанизация и, как следствие, вынужденное сокращение сельскохозяйственных угодий поставит перед агропромышленным комплексом вопрос: где взять ресурсы для получения пищевого белка в таком количестве, чтобы удовлетворить потребности населения планеты.

[27] *Колпакова В.В., Бызов В.А.* Функциональные характеристики и молекулярно-структурная модификация растительных белков. Обзор // Пищевые системы. 2024. Т. 7. № 3. С. 324—335.

[28] *Волкова Т.И., Стёпина Е.Д.* Микроводоросли как альтернативный источник кормового белка // Сборник трудов X Конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 14—17 апреля 2021 г.). Т. 3. СПб.: Национальный исследовательский ун-т ИТМО, 2021. С. 66—69.

Для обеспечения продовольственной безопасности в мире, в частности в РФ, а также для предотвращения угрозы глобального голода необходим поиск альтернативного протеинсодержащего сырья, способного восполнить дефицит белка в рационе человека и частично снизить либо полностью заменить потребление животного белка. В качестве сырьевой базы для получения альтернативного пищевого белка в международной практике рассматриваются растения и насекомые. Для России, богатой водными ресурсами, перспективным источником пищевого белка является альгофлора — водоросли (макрофиты) и микроводоросли (микрофиты).

Целью данной работы является анализ и характеристика исследований, направленных на изучение альтернативных источников белка и их устойчивости в условиях урбанизации с учетом их химических и биотехнологических особенностей.

В качестве материалов для исследования использовались научные публикации, появившиеся в период с 2015 по 2024 гг., отличающиеся уровнем актуальности, цитируемости и достоверности результатов.

Поиск и отбор литературы осуществлялся в библиографических базах Google Scholar, ResearchGate, eLIBRARY.RU, КиберЛенинка, Scopus, PubMed по ключевым словам: «альтернативные источники белка», «глобальный голод», «водорослевый протеин», «микроводоросли». Информация из публикаций была систематизирована и обобщена.

Переход от традиционного белка к альтернативному. Устойчивый рацион питания необходим для обеспечения роста и развития населения планеты, поддержания его физического, психологического и социального благополучия. Устойчивый рацион питания должен быть доступен всем слоям населения. Он включает в себя потребление макронутриентов (белки, жиры, углеводы) и микронутриентов (витамины, минеральные вещества). Дефицит даже одного из необходимых компонентов рациона питания может привести к недоеданию, избыточному весу, ожирению и другим проблемам здоровья[29].

Растущее население планеты, урбанизация и климатические изменения усложняют доступность важных для человеческого организма питательных веществ, в частности пищевого белка. Это вынуждает искать альтернативные источники сырья, богатые макро- и микронутриентами. Источники пищевого белка должны удовлетворять потребности живого организма в незаменимых аминокислотах, таких как валин, лейцин, изолейцин, лизин, метионин, треонин, триптофан и фенилаланин (для детей — аргинин и гистидин). Для оценки качества пищевого

[29] *Ahnen R.T., Jonnalagadda S.S., Slavin J.L.* Role of plant protein in nutrition, wellness, and health // Nutrition Reviews. 2019 Vol. 77. № 11. P. 735—747.

белка используют следующие методы: 1. скорректированный аминокислотный коэффициент усвояемости белка (PDCAAS), сущность которого заключается в оценке белка по содержанию незаменимых аминокислот, усвояемости белка и доступности незаменимых аминокислот; 2. аминокислотный скор с поправкой на усвояемость незаменимых аминокислот (DIAAS), который оценивает усвояемость каждой незаменимой аминокислоты[30].

Основными источниками пищевого белка являются белки животного происхождения и растительные белки, полученные из сельскохозяйственных культур. Белки животного происхождения являются важной частью устойчивого рациона, они обеспечивают организм легко усвояемыми незаменимыми аминокислотами, витамином B_{12} и минеральными веществами — железом, цинком, селеном.

Производство животного белка ресурсозатратно. Для его поддержания, в том числе для выращивания кормовых культур эксплуатируется 70 % пресноводных ресурсов, 30 % земельных угодий, в том числе 83 % сельскохозяйственных угодий в мире, 20 % энергии. При этом атмосфера загрязняется парниковыми газами (11—20 %) и аммиаком (59 %)[31].

Спрос на потребление белка животного происхождения растет. Динамика и прогноз производства мяса в мире представлены на Рис. 1.

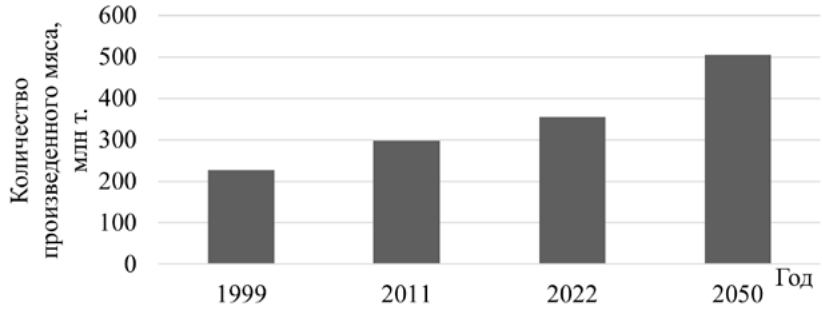

Рис. 1. Прогноз производства мяса в мире к 2050 г., млн т.

Потребность в животном белке стимулирует поиск новых способов, улучшающих его качество: селекция пород, способы разведения

[30] *Azizi R.* et al. Protein transition: focus on protein quality in sustainable alternative sources // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. P. 1—21.

[31] *Рождественская Л.Н., Бычкова Е.С., Бычков А.Л.* Анализ вызовов и современные тенденции развития технологий на рынке белков // Пищевая промышленность. 2018. № 5. С. 42—47.

скота, альтернативные системы кормления (новое питательное сырье для кормов и добавок).

В качестве растительных источников пищевого белка используются зернобобовые культуры: горох, фасоль обыкновенная, люпин, соя, чечевица и нут[32]. Содержание белка в растительном сырье зависит от его обработки: сырая масса состоит из белка на 20—36 %, однако после термической обработки и, как следствие, разрушения фенольных соединений количество белка в сырье снижается до 17—20 %.

Выращивание зернобобовых культур по сравнению с производством животного белка менее ресурсозатратно и обладает экологическим преимуществом — фиксирует азот и улучшает качество почвы. Однако растительный белок имеет особенности, усложняющие полное замещение им животного белка: неполный аминокислотный профиль, низкая усвояемость в необработанном виде, аллергенность[33]. Сравнение показателей качества пищевого белка, полученного из животного и растительного сырья, представлено в Табл. 1.

Табл. 1. Показатели качества животного и растительного белка.

Источник белка	**Показатель качества белка, %**	
	PDCAAS	**DIAAS**
Сухое цельное молоко	116,1	115,6
Яйцо	105	113
Говядина	114,0	113
Куриная грудка	101	108
Соя	102,0	99,6
Горох	78,2	64,7
Пшеница	46,3	40,2

Белки и пептиды, полученные из зернобобовых культур, широко используются для производства белка и пептидов (50 % мирового рынка) и в качестве основы кормления в животноводстве (40 % от всего растительного белка). Спрос на растительный белок вынуждает культи-

[32] *Асадова А.И.* Бобовые как альтернативный источник белка в повседневном рационе человека // Знание. 2016. № 6-1 (35). С. 30—36.

[33] *Бычкова Е.С., Рождественская Л.Н., Бычков А.Л., Подгорбунских Е.М.* Альтернативные источники белка как основа перспективного развития пищевых производств // Современные технологии: проблемы и тенденции развития. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2022. С. 221—257.

вировать новые сорта, что, в свою очередь, приводит к утрате биоразнообразия.

Однако постоянный рост поголовья скота и расширение сельскохозяйственных угодий невозможны. С 1962 по 2019 г. наблюдается мировая тенденция сокращения общей площади сельскохозяйственных угодий на 80,4 %, что вызвано интенсификацией сельскохозяйственного производства[34]. В России сокращение посевных угодий с 2000 г. на 29,8 % вызвано урбанизацией, при которой площадь населенных пунктов выросла в 3,5 раза, и деградацией почв, являющейся следствием выпахивания, дегумификации и загрязнения пестицидами[35].

В качестве альтернативного протеинсодержащего сырья в мировой практике рассматриваются насекомые. По сравнению с традиционными источниками белка насекомые более экологически устойчивы: могут размножаться на отходах и органических субстратах, богатых белком, в том числе на сельскохозяйственных отходах, экологичны с точки зрения землепользования и водопользования.

В настоящее время известно более 200 видов съедобных насекомых, из которых наиболее распространены представители отряда жесткокрылых (жуки), чешуекрылых (бабочки), перепончатокрылых (пчелы, осы, муравьи), прямокрылых (мухи) (Рис. 2)[36].

В зависимости от вида и стадии развития биомасса насекомых содержит 13—80 % белка. Однако экзоскелет личинок насекомых, состоящий из хитина — азотсодержащего полисахарида, который ухудшает усвояемость незаменимых аминокислот и биодоступность белка, а также возможность загрязнения сырья пестицидами ограничивают потенциал использования насекомых в качестве альтернативного источника сырья[37].

В связи с климатическими изменениями, техногенными загрязнениями и неминуемой дальнейшей урбанизацией необходим частичный отказ от эксплуатации земельных ресурсов и поиск альтернативных источников пищевого белка, которые не только сократят

---

[34] *Улыбина Л.В.* Современное состояние и проблемы развития агропромышленного комплекса РФ в контексте экономической безопасности // Аграрная наука. 2024. № 7. С. 179—186.

[35] *Барсукова Г.Н., Шеуджен З.Р., Деревенец Д.К.* Сокращение площади сельскохозяйственных угодий и пашни как общемировая тенденция уменьшения части ресурсного потенциала аграрного производства // International agricultural journal. 2021. № 6. С. 524—544.

[36] *Тышко Н.В., Жминченко В.М., Никитин Н.С.* и др. Комплексные исследования биологической ценности белка личинки Hermetia illucens // Вопросы питания. 2021. Т. 90. № 5. С. 49—58.

[37] FAO. 2021. Looking at edible insects from a food safety perspective: challenges and opportunities for the sector. Rome, FAO, 2021. 108 p.

потребление животного белка, но и будут оказывать положительное влияние на окружающую среду и биоразнообразие.

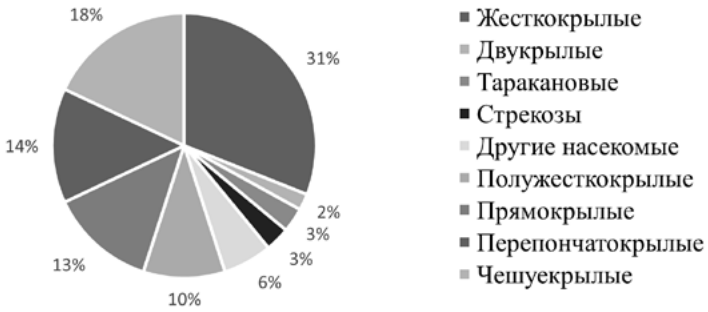

Рис. 2. Насекомые, употребляемые в пищу человеком (по данным мировых продаж)[38].

Российская альгофлора в качестве источника альтернативного белка. В настоящее время потенциал российской альгофлоры (макро- и микрофиты) не раскрыт в полной мере. Запас промысловых видов морских водорослей-макрофитов, таких как ламинария, фукус и анфельция, составляет 30 млн т сырой массы. Промысел водорослей локализован в основном в Белом, Балтийском и Баренцевом морях и в зависимости от особенностей произрастания водоросли осуществляется путем механического или ручного скашивания. При добыче ламинарии применяется ручная канза или канза с механическим приводом, при добыче анфельции — закидные неводы, гребешковые драги и гидронасосы. В случае, если запасы водоросли сокращены, собираются ее штормовые выбросы[39].

Особенность водорослей заключается в накоплении в слоевище биологически активных веществ, таких как структурные полисахариды (альгинаты, агар, каррагинан), обладающие гелеобразующей способностью, полиненасыщенные жирные кислоты (γ-линолевая, арахидоновая, эйкозапентаеновая), витамины С, А, Е, группы В и др., фо-

[38] FAO. 2023. Contribution of terrestrial animal source food to healthy diets for improved nutrition and health outcomes: An evidence and policy overview on the state of knowledge and gaps. Rome, FAO, 2023. 296 p.

[39] *Павлова А.А., Восканян О.С.* Водоросли — сырьевая база для косметической продукции // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения / Под ред. И.И. Богданова и др. Ульяновск: ГАУ, 2022. С. 2626—2630.

тосинтетические пигменты — хлорофилл, каротиноиды, фикобилины. Промысловые водоросли используются в качестве гелеобразователей, загустителей, эмульгаторов, пигментов и биологически активных добавок в таких отраслях промышленности, как косметическая, пищевая и фармацевтическая.

Содержание белковых веществ в промысловых водорослях лабильно и зависит от возраста, сезона скашивания и части слоевища — в нижней, более массивной части слоевища содержится в 2,5 раза больше белка, чем в верхней. В промысловых водорослях содержится от 4,4 до 47,5 % белковых веществ, в том числе 15—23 аминокислот, из которых 8 — незаменимые. Особенность водорослевого белка заключается в более низком содержании азота по сравнению с животным белком за счет преобладания в составе глутаминовой и аспарагиновой аминокислот[40].

В отличие от производства животного белка и выращивания наземных культур, производство водорослей более экологически безопасно, не требует использования химических удобрений и пестицидов, загрязняющих окружающую среду. Однако в настоящее время вследствие интенсивного использования промысловых видов водорослей их добыча с каждым годом сокращается. Увеличить долю растительного белка в питании населения, а также в полной мере использовать потенциал водорослей возможно с помощью микроводорослей[41].

Микроводоросли (микрофиты) — фотосинтезирующие микроорганизмы, которые в процессе жизнедеятельности производят половину атмосферного кислорода Земли и могут произрастать в морских и пресных водах, в почвах и горных породах, а также в условиях, неблагоприятных для возделывания наземных сельскохозяйственных культур. Известно 25 тыс. видов микроводорослей, промысловыми являются хлорелла, спирулина и др.

На сегодняшний день производство микроводорослей составляет 35 тыс. т сухой биомассы в год, основными странами-производителями являются США, Германия, Китай и Япония[42]. Переработанная биомасса микроводорослей используется в виде порошков, таблеток и капсул

[40] *Пучкова Т.В.* Водоросли: наука, практика, перспективы. М.: Школа косметических химиков, 2018. 352 с.

[41] *Thy V.B., Vin B.T.* Protein from plants and algae: potential trends of replacing animal protein for public health // International Journal of Life Science and Agriculture Research. 2024. Vol. 3. № 06. P. 503—506.

[42] *Сутула Г.И., Рябухин Д.С.* Микроводоросли и насекомые как альтернативные источники белка: преимущества и риски // Пищевые системы. 2023. Т. 6. № 4. С. 497—503.

как отдельный продукт или в качестве биологически активной добавки в продуктах питания, в фармацевтике, в косметической отрасли. Благодаря фитоэкстракции, т. е. способности микроводорослей поглощать из окружающей среды техногенные загрязнения, их используют также для фикоремедиации — очистки сточных вод.

Функциональная ценность микроводорослей заключается в высоком (до 70 %) содержании белка, а также в их способности набирать биомассу в 30 раз быстрее, чем наземные сельскохозяйственные культуры. Сопоставление содержания белка и показателей его качества в некоторых видах микроводорослей и в традиционных животных и растительных источниках белка представлено в Табл. 2.

Табл. 2. Содержание белка и показатели его качества в животных, растительных и микроводорослевых источниках.

Источник белка	Содержание белка, %	Показатель качества белка, %	
		PDCAAS	DIAAS
Говядина	50	114,0	113
Куриная грудка	63	101	108
Соя	35	102,0	99,6
Нут	18	78	76
Хлорелла	51—58	81	111
Спирулина	60—70	84	90

Промышленное выращивание микроводорослей осуществляется посредством культивирования биомассы в питательной минеральной среде. Оно подразделяется на автотрофное (в бассейнах с доступом к солнечному свету или в закрытых фотобиореакторах) и гетеротрофное (в ферментерах). Для получения биомассы с высоким содержанием белка важны условия выращивания микроводорослей: температура, уровень углекислого газа, интенсивность света, pH, соленость воды, доступность питательных веществ[43].

Сбор биомассы микроводорослей осуществляется механически, с помощью центрифугирования, отстаивания или насосной системы фильтрации. Он может быть отягощен флокуляцией — комкообразованием микроводорослей, нейтрализовать которое можно с помощью флокулянтов[44].

[43] *Alishah A.H.* et al. Biomass and lipid induction strategies in microalgae for biofuel production and other applications // Microbial Cell Factories. 2019. Vol. 18. P. 1—17.

[44] *Matter I.A.* et al. Flocculation harvesting techniques for microalgae: A Review

Невысокая усвояемость микроводорослевого белка, вызванная наличием целлюлозной клеточной стенки микрофитов, препятствует его становлению в качестве альтернативного пищевого белка. Для повышения качества и устойчивости микроводорослевого белка необходима разработка инновационных технологий получения и переработки биомассы микрофитов.

Выводы. Рост населения планеты, климатические изменения, техногенные загрязнения и урбанизация обусловливают необходимость поиска альтернативных источников сырья, богатого макро- и микронутриентами, в частности пищевым белком, для полноценного питания человечества. В качестве такого альтернативного и перспективного источника пищевого белка предлагается альгофлора, в частности макрофиты, произрастающие в водах России, и микроводоросли.

Список литературы

1. *Асадова А.И.* Бобовые как альтернативный источник белка в повседневном рационе человека // Знание. 2016. № 6-1 (35). С. 30—36.

2. *Барсукова Г.Н., Шеуджен З.Р., Деревенец Д.К.* Сокращение площади сельскохозяйственных угодий и пашни как общемировая тенденция уменьшения части ресурсного потенциала аграрного производства // International agricultural journal. 2021. № 6. С. 524—544.

3. *Бычкова Е.С., Рождественская Л.Н., Бычков А.Л., Подгорбунских Е.М.* Альтернативные источники белка как основа перспективного развития пищевых производств // Современные технологии: проблемы и тенденции развития. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2022. С. 221—257.

4. *Волкова Т.И., Стёпина Е.Д.* Микроводоросли как альтернативный источник кормового белка // Сборник трудов X Конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 14—17 апреля 2021 г.). Т. 3. СПб.: Национальный исследовательский ун-т ИТМО, 2021. С. 66—69.

5. *Колпакова В.В., Бызов В.А*. Функциональные характеристики и молекулярно-структурная модификация растительных белков. Обзор // Пищевые системы. 2024. Т. 7. № 3. С. 324—335.

6. *Павлова А.А., Восканян О.С.* Водоросли — сырьевая база для косметической продукции // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения / Под ред. И.И. Богданова и др. Ульяновск: ГАУ, 2022. С. 2626—2630.

7. *Пучкова Т.В.* Водоросли: наука, практика, перспективы. М.: Школа косметических химиков, 2018. 352 с.

// Applied Sciences. 2019. Vol. 9.P. 1—27.

8. *Рождественская Л.Н., Бычкова Е.С., Бычков А.Л.* Анализ вызовов и современные тенденции развития технологий на рынке белков // Пищевая промышленность. 2018. № 5. С. 42—47.

9. *Сутула Г.И., Рябухин Д.С.* Микроводоросли и насекомые как альтернативные источники белка: преимущества и риски // Пищевые системы. 2023. Т. 6. № 4. С. 497—503.

10. *Тышко Н.В., Жминченко В.М., Никитин Н.С.* и др. Комплексные исследования биологической ценности белка личинки Hermetia illucens // Вопросы питания. 2021. Т. 90. № 5. С. 49—58.

11. *Улыбина Л.В.* Современное состояние и проблемы развития агропромышленного комплекса РФ в контексте экономической безопасности // Аграрная наука. 2024. № 7. С. 179—186.

12. *Ahnen R.T., Jonnalagadda S.S., Slavin J.L.* Role of plant protein in nutrition, wellness, and health // Nutrition Reviews. 2019. Vol. 77. № 11. P. 735—747.

13. *Alishah A.H.* et al. Biomass and lipid induction strategies in microalgae for biofuel production and other applications // Microbial Cell Factories. 2019. Vol. 18. P. 1—17.

14. *Azizi R.* et al. Protein transition: focus on protein quality in sustainable alternative sources // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2024. P. 1—21.

15. FAO. 2021. Looking at edible insects from a food safety perspective: challenges and opportunities for the sector. Rome, FAO, 2021. 108 p.

16. FAO. 2023. Contribution of terrestrial animal source food to healthy diets for improved nutrition and health outcomes: An evidence and policy overview on the state of knowledge and gaps. Rome, FAO, 2023. 296 p.

17. *Matter I.A.* et al. Flocculation harvesting techniques for microalgae: A Review // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. P. 1—27.

18. *Thy V.B., Vin B.T.* Protein from plants and algae: potential trends of replacing animal protein for public health // International Journal of Life Science and Agriculture Research. 2024. Vol. 3. № 06. P. 503—506.

Сведения об авторах

Восканян Ольга Станиславовна, доктор технических наук, профессор кафедры инновационных технологий продуктов из растительного сырья Московского государственного университета технологий и управления имени К.Г. Разумовского. E-mail: *021602@mail.ru*

Павлова Арина Александровна, магистрант кафедры инновационных технологий продуктов из растительного сырья Московского государственного университета технологий и управления имени К.Г. Разумовского. E-mail: *pavlova.a.a.17@yandex.ru*

Information about the authors

Voskanyan Olga Stanislavovna, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Innovative Technologies of Products from Vegetable Raw Materials, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management. E-mail: *021602@mail.ru*

Pavlova Arina Alexandrovna, Master's Student of the Department of Innovative Technologies of Products from Vegetable Raw Materials, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management. E-mail: *pavlova.a.a.17@yandex.ru*