

УДК: 613.26:613.6.01

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *CHLORELLA* В КАЧЕСТВЕ БИОПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)

Гертан Н.А.¹, Минигалиева И.А.^{1,2}, Сутункова М.П.^{1,3}, Куляшова П.Д.¹, Гурвич В.Б.¹,
Мажаева Т.В.¹

¹ ФБУН «Екатеринбургский медицинский – научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий» Роспотребнадзора, Екатеринбург, Россия

² ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, Екатеринбург, Россия

³ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

В современном мире микроводоросли рода *Chlorella* широко используются в различных отраслях науки и промышленности, например, в качестве моделей исследований, пищевых добавок, компонентов очистных систем, что обусловлено высоким содержанием в них биологически активных соединений и способностью к быстрому размножению.

Цель исследования – изучение полезных свойств микроводорослей рода *Chlorella* и возможности их использования в качестве биопрофилактического средства негативного воздействия окружающей среды и производственных факторов.

Материал и методы. Для выявления ключевых литературных источников были задействованы базы данных и электронные библиотеки eLIBRARY.RU, PubMed и Google Scholar. В качестве критерия включения выступали сведения об эффектах воздействия водорослей рода *Chlorella*. Были исключены исследования, опубликованные до 2015 года и описывающие микроводоросли других родов.

Результаты. Изучив литературные источники, были выявлены основные полезные свойства микроводорослей рода *Chlorella*: антиоксидантные, противовоспалительные, антиапоптотические и сорбирующие. Рассмотрены варианты обогащения основных продуктов питания и возможные ограничения, связанные с сохранением их полезных свойств, доступностью и безопасностью.

Ограничения исследования. В анализ были включены только публикации на русском и английском языках с 2016 по 2026 годы. Использование ограниченного

числа баз данных не исключает возможности пропуска релевантных исследований, опубликованных в других источниках

Заключение. В совокупности свойства микроводорослей рода *Chlorella* позволяют предполагать их эффективность в качестве биопрофилактического средства, направленного на повышение устойчивости организма к вредному воздействию токсикантов, а обнаруженные ограничения не являются абсолютным препятствием, но требуют дополнительного изучения.

Ключевые слова: микроводоросли, хлорелла, биологически активные вещества, антиоксидантные свойства, противовоспалительные свойства, сорбенты, биопрофилактика

Соблюдение этических стандартов: проведение настоящего исследования не требовало одобрения этического комитета, поскольку работа не связана с использованием человека или животных в качестве объектов исследования.

Использование инструментов искусственного интеллекта: авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Гертан Н.А., Минигалиева И.А., Сутункова М.П., Куляшова П.Д., Гурвич В.Б., Мажаева Т.В. Использование микроводорослей *chlorella* в качестве биопрофилактического средства (литературный обзор). Медицина труда и экология человека. 2026; 3:287-304.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10315>

Для корреспонденции: Наталья Александровна Гертан, e-mail: gertan00@mail.ru

APPLICATION OF CHLORELLA VULGARIS AS A BIOPROPHYLLACTIC AGENT

(A LITERATURE REVIEW)

Gertan N.A.¹, Minigalieva I.A.^{1,2}, Sutunkova M.P.^{1,3}, Kulyashova P.D.¹, Gurvich V.B.¹, Mazhaeva T.V.¹

¹Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, Yekaterinburg, Russian Federation

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

³Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russian Federation

Chlorella microalgae are widely used in various fields of science and industry today, for example, as research models, food additives, components of sewage treatment systems, owing to their high content of biologically active compounds and rapid reproduction.

The aim of this study was to investigate the advantages of *Chlorella* and its potential use as a bioprophylactic agent of the negative effects of the environment and industrial factors.

Materials and Methods. eLIBRARY.RU, PubMed, and Google Scholar databases and electronic libraries were used to identify key literature sources. Information on the effects of *Chlorella* microalgae was used as an inclusion criterion. Studies published before 2015 and describing microalgae of other genera were excluded.

Results. The article describes the key benefits of *Chlorella vulgaris* attributed to its antioxidant, anti-inflammatory, anti-apoptotic, and sorbent properties, discusses options for fortifying staple foods and potential limitations associated with preserving their beneficial properties, availability, and safety.

Study limitations. Russian and English-language publications issued in 2016–2026 were included in the analysis. The use of a limited number of databases does not exclude that relevant studies published elsewhere were omitted.

Conclusion. Taken together, the properties of microalgae of the genus *Chlorella* suggest their effectiveness as a bioprophylactic agent aimed at increasing the resistance of the human organism to adverse effects of toxicants. The identified limitations are not an absolute obstacle but require further research.

Keywords: microalgae, *Chlorella*, food supplements, antioxidant properties, anti-inflammatory properties, sorbents, bioprophylaxis

Compliance with ethical standards: This study did not require approval from an ethics committee, as it did not involve the use of humans or animals as research subjects.

Declaration of AI use: The authors declare that no artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Funding: This research received no external funding.

For citation: Gertan N.A., Minigalieva I.A., Sutunkova M.P., Kulyashova P.D., Gurvich V.B., Mazhaeva T.V. Application of chlorella vulgaris as a bioprophylactic agent (a literature review). Occupational Health and Human Ecology. 2026; 3:287-304.

doi: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10315>

For correspondence: Natalia A. Gertan, e-mail: gertan00@mail.ru

Микроводоросли рода *Chlorella* относятся к отряду *Chlorococcales*, семейству *Chlorellaceae* и представляют собой одноклеточные организмы сферической или овальной формы размером 2–10 мкм. Широко известны виды *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*), *Chlorella pyrenoidosa* (*C. pyrenoidosa*), *Chlorella protothecoides* (*C. Protothecoides*), *Chlorella sorokiniana* (*C. sorokiniana*). Их использование становится всё более распространено в различных отраслях науки и промышленности, в том числе сельскохозяйственной, химической, пищевой, фармацевтической, что связано с их биологической и экономической эффективностью, обусловленной высоким содержанием биологически активных соединений и способностью к быстрому размножению⁵³ [1-3].

Особый интерес представляет использование данных микроводорослей в качестве пищевой добавки. По литературным данным *Chlorella* содержат много полезных белков, липидов, углеводов, витаминов и минералов, и соответственно обладает высокой питательной ценностью [2-5]. Более того, есть данные о высокой антиоксидантной и противовоспалительной активности, а также сорбирующих свойствах микроводорослей [2, 5]. Биопрофилактика необходима для населения и, в особенности, контингенту, работающему во вредных производственных условиях.

Таким образом, **целью исследования** стало изучение полезных свойств микроводорослей рода *Chlorella* и возможности их использования в качестве биопрофилактического средства.

Материал и методы. Для выявления ключевых литературных источников были задействованы базы данных и электронные библиотеки eLIBRARY.RU, PubMed и Google Scholar. Поиск осуществлялся на русском и английском языках с использованием определённых ключевых слов: микроводоросли, хлорелла, биологически активные вещества, антиоксидантные свойства, противовоспалительные свойства, сорбенты, биопрофилактика, microalgae, chlorella, biologically active substances, antioxidant properties, anti-inflammatory

⁵³ Патент RU2692654 C2. НОВЫЕ НЕАЛЛЕРГЕННЫЕ ЛЕГКИЕ ЗАКУСКИ, СОДЕРЖАЩИЕ РАСТИТЕЛЬНЫЕ БЕЛКИ / С. ЛЯГАШ, Л. РЕТУРН, Ж. ЛИС, Ф. МАРКИЙИ. – 2019.

properties, sorbents, bioprophylaxis. Списки литературы включенных исследований были изучены с целью поиска дополнительных статей. В качестве критерия включения выступали сведения об эффектах воздействия микроводорослей рода *Chlorella* на организм человека. Были исключены исследования, опубликованные до 2015 года и описывающие микроводоросли других родов. Всего было включено 50 исследований (37 за последние 5 лет).

Результаты и обсуждение.

Питательная ценность микроводорослей рода Chlorella

Микроводоросли рода *Chlorella* характеризуются богатым содержанием биологических компонентов, обеспечивающих их высокую питательную ценность и некоторые полезные свойства, необходимые для биопрофилактической эффективности [6-8]. Так, в их составе содержатся каротиноиды, фенольные соединения, лимонная кислота, токоферолы и рутин, известные своими антиоксидантными свойствами [2, 6-8], биологически активные липиды, включая как насыщенные, так и полиненасыщенные жирные кислоты [5, 9, 10], уровень которых в *C. vulgaris* положительно коррелирует с их антиоксидантной активностью [9], и полисахариды, способные нейтрализовать свободные радикалы, повышать активность ферментов, связанных с устойчивостью к окислительному стрессу, и обладающие способностью к хелатированию металлов [11].

Кроме того, *Chlorella* обладают высоким содержанием микроэлементов и витаминов, таких как фосфор, натрий, калий, магний, железо, кальций, медь, марганец, цинк, и витамины (Р, А, К, В1, В2, В3, В6, В12) [1, 6, 8, 12], многие из которых могут снижать окислительный стресс и воспаление [6, 12, 13], в том числе посредством взаимодействия с сигнальными путями эритроидного ядерного фактора 2-го типа (Nrf2) и ядерного фактора «каппа-би» (NF-κB), регулируемыми выработку антиоксидантных ферментов и провоспалительных цитокинов [8, 14, 15].

Антиоксидантные свойства микроводорослей рода Chlorella

Рассматривая особенности биопрофилактического эффекта микроводорослей рода *Chlorella* нельзя не выделить их антиоксидантные свойства, за счёт которых они могут снижать окислительный стресс, в том числе индуцированный вредными химическими производственными факторами [8]. Подобный эффект может быть обусловлен их способностью нейтрализовать свободные радикалы [7-9], подавлять работу ферментов НАДФН-оксидазы [16], активировать путь Nrf2 /

гемоксигеназы-1 [17, 18], а также ингибировать образование малонового диальдегида и поддерживать баланс окислительно-восстановительной системы за счёт регуляции уровней антиоксидантов [2, 5, 8, 17, 19, 20].

Противовоспалительные и антиапоптотические свойства микроводорослей рода Chlorella

Противовоспалительные свойства микроводорослей рода *Chlorella* также были зафиксированы во многих исследованиях, что значительно повышает их эффективность в качестве биопрофилактического средства. Например, *C. pyrenoidosa* и *C. vulgaris* подавляли денатурацию альбумина [10], стимулировали активацию иммунной системы, способствуя увеличению пула регуляторных Т-клеток [21], ингибировали транскрипционный фактор NF-κB [17], индуцибельную синтазу оксида азота и циклооксигеназу-2 [20], что приводило к снижению продукции воспалительных цитокинов (фактора некроза опухоли, простагландина E2 и интерлейкина-6, трансформирующего фактора роста β1, оксида азота) [8, 16-18, 22, 23], подавляли экспрессию мРНК инфламماسомы NLRP3 (NLR family pyrin domain containing 3), что способствовало снижению иммуноэкспрессии каспазы-1 и последующей иммуноэкспрессии миелопероксидазы [17], тем самым обеспечивая противовоспалительный эффект. Кроме того, использование *C. vulgaris* приводило к положительным изменениям в составе кишечной микробиоты, что усиливало синтез короткоцепочечных жирных кислот [21], играющих важную роль в адаптивных иммунных функциях [24].

Некоторые исследования продемонстрировали также антиапоптотический эффект *C. vulgaris* (6%, 300 мг/кг м.т.) за счет уменьшения уровней маркеров апоптоза каспазы-3 и белка Вах и повышения экспрессии антиапоптотического гена регулятора апоптоза *Bcl-2* [17, 25].

Сорбирующие свойства микроводорослей рода Chlorella

Известна высокая сорбирующая способность микроводорослей в водных системах. Микроводоросли *C. sorokiniana* и *C. vulgaris* и продукты их переработки показали свою эффективность в удалении как неорганических, так и органических загрязнителей из водного раствора, что, вероятно, обусловлено содержанием функциональных групп (карбоксильные, amino- и гидроксильные) на своей поверхности, которые могут участвовать в процессе биосорбции посредством ионного обмена, а также механической и промежуточной абсорбции [26-28].

Исследование Yadav M. и соавт. показало высокую сорбционную активность *C. vulgaris* (500 и 1000 мг/70 кг м.т.) в живых системах – наблюдалось значительное

снижение накопления стронция и таллия в организме мышей и увеличение их выведения с калом и мочой [29]. Это позволяет предполагать эффективность *Chlorella* в удалении вредных химических соединений из организма человека и снижении таким образом токсических эффектов.

Биопрофилактика негативного воздействия окружающей среды микроводорослями рода Chlorella

Защитный эффект *Chlorella* наблюдался в исследованиях токсического воздействия различных соединений (нитрит натрия 80 мг/кг м.т., флуоксетин 170 и 510 мг/кг м.т., глутамат натрия 1200 мг/кг в день, цисплатин 1,34 мг/кг м.т., доксорубин 3 мг/кг м.т.) – *C. vulgaris* (70 мг/кг м.т., 150 мг/кг м.т., 300 мг/кг м.т., 500 мг/кг м.т.) подавляли вызванные ими воспаление, окислительный стресс, апоптоз, а также гепатотоксические [18, 30, 31], нефротоксические [18], спленотоксические [18], репротоксические (у самцов и самок) [25, 31-33], тератогенные и эмбриотоксические эффекты [31].

Более того, *Chlorella* были эффективны в биопрофилактике негативного воздействия тяжёлых металлов, что особенно полезно для рабочих промышленных предприятий, подверженных воздействию данных соединений. В частности, *C. vulgaris* (500 мг/кг м.т., 15 г/кг м.т.) предотвращали индуцированные хлоридом кадмия (2 мг/кг м.т., 2,5 мг/л) окислительный стресс и воспаление, а также снижали повреждение печени, почек и репродуктивных органов, в том числе на генетическом уровне, за счет поддержания клеточного окислительно-восстановительного гомеостаза, снижения воспалительных эффектов, апоптоза и повышения выживаемости клеток [8, 34, 35].

Исследования показали, что они также могут использоваться в качестве биопрофилактического средства при различных заболеваниях, в том числе хронической обструктивной болезни лёгких [36], сахарном диабете 2 типа [37] и метаболически ассоциированной жировой болезни печени [38].

Благоприятный эффект использования данных микроводорослей был отмечен и в клинических исследованиях, что проявлялось в улучшении общего состояния добровольцев и их антиоксидантного статуса, снижении у них маркеров окислительного стресса и старения (тиобарбитуратных реактивных веществ, 8-гидрокси-дезоксигуанозина, малонового диальдегида), а также значительной защите печени (за счет снижения глутамат-оксалоацетаттрансаминазы и глутамат-пируваттрансаминазы) [20, 39].

Кроме того, микроводоросли *Chlorella* обладают антибактериальной активностью в отношении грамположительных и грамотрицательных патогенных бактерий [8, 40-42], что в сочетании с их противовоспалительными, антиоксидантными и антиапоптотическими свойствами положительно влияет на микробиоту кишечника и метаболический гомеостаз [21, 36].

Обогащение продуктов питания микроводорослями рода Chlorella

Несмотря на многочисленные полезные свойства данных микроводорослей, их употребление в пищу в чистом виде может вызвать затруднения из-за специфических органолептических свойств. Поэтому для внедрения *C. vulgaris* в повседневное питание или рационы лечебно-профилактического питания в качестве одного из профилактических мероприятий на производстве необходимо предусмотреть различные варианты их употребления, в том числе в составе привычных продуктов питания.

Обогащение продуктов питания микроводорослями *Chlorella* может повысить пищевую ценность продукта и функциональные свойства, включая абсорбцию, ослабляя таким образом процессы интоксикации и способствуя сохранению и укреплению здоровья людей [43].

Изучали возможность обогащения зерновых [43, 44], молочных [45] и кисломолочных продуктов [46], какао [47]. В конечных продуктах отмечали увеличение содержания полезных макро- и микроэлементов (хлебные палочки, сыр, какао), ускорение ферментации (айран) и повышенную антиоксидантную активность (сыр). Органолептические показатели претерпевали изменения, в основном связанные с консистенцией, цветом и запахом, но оставались удовлетворительными при небольшой доли включения водорослей. Однако избыточное включение *Chlorella* (14%) в рацион может негативно сказаться на усвояемости продукта и неоднозначно влиять на микробиоту кишечника [19], что необходимо учитывать при разработке обогащённого продукта.

Нормативно-правовые аспекты безопасности использования микроводорослей рода Chlorella

Зарубежом для микроводорослей рода *Chlorella* Регламент (ЕС) № 396/2005⁵⁴ устанавливает допустимый максимальный уровень содержания в них ртути (0,01 мг/кг), меди (20,0 мг/кг м.т.) и других соединений. На территории Российской

⁵⁴ Algae and prokaryotes organisms. Product details. Food Safety. European Commission. URL: <https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/start/screen/products/details/200> (Дата обращения: 04.05.2026)

федерации безопасность их использования для изготовления биологически активных добавок к пище регламентируется техническим регламентом Таможенного союза⁵⁵ «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011), который устанавливает допустимый уровень микробиологических и химических показателей, в том числе содержания в них мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов не более 1×10^4 КОЕ/г, бактерий группы кишечных палочек (не допускается в 0,1 г продукта), *E.coli* (не допускается в 1,0 г продукта), плесени и дрожжей не более 100 КОЕ/г (ТР ТС 021/2011, Приложение 2, таблица 1.9); свинца не более 2,0 мг/кг, мышьяка 1,0 мг/кг, кадмия 1,0 мг/кг, ртути 0,1 мг/кг (ТР ТС 021/2011, Приложение 3, таблица 10); а также пестицидов: гексахлоран и дихлордифенилтрихлорэтан не более 0,1 мг/кг, нитратов не более 1000 мг/кг. Содержание диоксинов, гептахлора и алдрина не допускается (ТР ТС 021/2011, Приложение 3, таблица 10).

*Возможные ограничения использования микроводорослей рода *Chlorella**

Необходимо отметить ряд возможных трудностей и ограничений при использовании микроводорослей рода *Chlorella* в качестве биопрофилактического средства. Несмотря на многочисленные данные об их пищевой и биологической ценности некоторые эффекты их употребления изучены недостаточно. Так, при сравнении различных экстрактов *C. vulgaris* один из образцов вызывал выраженные тонические сокращения изолированных гладких мышц желудка, сопровождающиеся усилением экспрессии интерлейкина-1 β и снижением иммунореактивности фермента нейрональной синтазы оксида азота, что указывает на обширную провоспалительную активацию наряду с сильным спазмогенным потенциалом. Данный эффект может быть полезен при нарушениях моторики желудочно-кишечного тракта с воспалительными компонентами, однако он требует осторожности при гипермоторике [10].

Высокие сорбционные свойства микроводорослей при несоблюдении санитарных норм и правил на любом из этапов производства или обработки могут привести к накоплению в них поллютантов или патогенных микроорганизмов, что делает необходимым строгий контроль показателей безопасности [2]. Вариативность антибактериальных свойств микроводорослей рода *Chlorella*, зависящая от штамма, условий выращивания и способа экстракции [40], также представляет проблему с точки зрения стандартизации и обеспечения стабильного качества продукта.

⁵⁵ Технический регламент Таможенного союза (ТР ТС 021/2011). «О безопасности пищевой продукции». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320560> (дата обращения 04.05.2026)

Кроме того, было обнаружено, что эффект от употребления *Chlorella* зависит от состояния их кишечной микрофлоры человека, что указывает на важность дифференцированного подхода к питанию с учетом данного факта [48]. Отмечают также вероятное снижение питательной ценности и эффективности *Chlorella*, связанные с трудностью её усвоения организмом из-за плотной клеточной стенки [49], однако в настоящее время активно разрабатываются методы, направленные на повышение доступности питательных веществ посредством добавления функциональных ферментов, способных разрушать клеточную стенку [50, 51].

Необходимо также учитывать экономические аспекты и ограничения, связанные с масштабом производства данных микроводорослей. Уровень полезных компонентов и метаболитов, их антиоксидантная активность может колебаться в зависимости от условий выращивания микроводоросли [7], что с одной стороны потенциально позволит определить наиболее эффективный метод выращивания и контролировать антиоксидантную активность, а с другой требует дополнительных промышленных ресурсов и контроля антиоксидантной активности.

Несмотря на обозначенные трудности, глобальное производство микроводорослей относительно стабильно и достигает приблизительно 30 000 тонн сухого веса всей биомассы микроводорослей [52, 53]. Хотя в России фактический уровень освоения природных ресурсов водорослей остаётся невысоким – около 8 000 тонн по данным Федерального агентства по рыболовству [54], перспективы их использования в качестве биопрофилактического средства заслуживают внимания и требуют дополнительного изучения.

Заключение. Изучив многочисленные полезные свойства микроводоросли рода *Chlorella*, в том числе антиоксидантные, противовоспалительные, антиапоптотические и сорбирующие, можно сделать вывод о возможности их использования в качестве биопрофилактического средства, в том числе при вредных условиях труда. Однако необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на повышение биодоступности и безопасности их использования для человека.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования – Минигалиева И.А., Сутункова М.П., Гурвич В.Б.
Сбор и обработка литературных данных – Гертан Н.А., Куляшова П.Д., Мажаева Т.В.
Написание текста и оформление статьи – Гертан Н.А., Куляшова П.Д.

Все соавторы – редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех ее частей.

Author contributions

Study conception and design – Minigalieva I.A., Sutunkova M.P., Gurvich V.B.

Literature data collection and processing – Gertan N.A., Kulyashova P.D., Mazhaeva T.V.

Draft manuscript preparation and design – Gertan N.A., Kulyashova P.D.

All co-authors – editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all its parts.

Список литературы (п.п. 1-3, 5-51 см. References):

4. Бабич О., Долганюк В., Андреева А., Кацеров Д., Мацкова Л., Ульрих Е., Иванова С., Мишо П., Сухих С. Выделение ценных биологических веществ из культуры микроводорослей. *Еда*. 2022;11(11):1654. <https://doi.org/10.3390/foods11111654>

52. Хвойников А.Н., Сангалова Е.Д., Орлова О.Ю. Тенденции и статистика развития рынка микроводорослей. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2021; 2(4): 278-282. <https://doi.org/10.17513/vaael.1678>

53. Рынок микроводорослей. ID отчета: 423570. 2025. Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/microalgal-powder-market/> Дата обращения: 04.05.2026.

54. Водорослевая индустрия России: перспективы развития и отраслевой потенциал. Научно-практическая конференция «Водорослевая индустрия России: перспективы развития и отраслевой потенциал». ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии» 2026. URL: <https://ion.ru/news/vodoroslevaya-industriya-rossii-perspektivy-razvitiya-i-otraslevoy-potentsial/>. Дата обращения: 23.06.2026.

References:

1. Fekete G., Sebők A., Klátyik S., Varga Z.I., Grósz J., Czinkota I., Székács A., Aleksza L. Comparative analysis of laboratory-based and spectroscopic methods used to estimate the algal density of *Chlorella vulgaris*. *Microorganisms*. 2024; 12(6): 1050. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12061050>.

2. Mendes A.R., Spínola M.P., Lordelo M., Prates J.A.M. Assessing the influence of cumulative *Chlorella vulgaris* intake on broiler carcass traits, meat quality and oxidative stability. *Foods*. 2024; 13(17): 2753. <https://doi.org/10.3390/foods13172753>.

3. Wang C.A., Onyeaka H., Miri T., Soltani F. *Chlorella vulgaris* as a food substitute: Applications and benefits in the food industry. *J Food Sci*. 2024; 89(12): 8231-8247. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17529>.

4. Babich O., Dolganyuk V., Andreeva A., Katserov D., Matskova L., Ulrikh E., Ivanova S., Michaud P., Sukhikh S. Isolation of valuable biological substances from microalgae culture. *Foods*. 2022; 11(11): 1654. <https://doi.org/10.3390/foods11111654>.

5. Ricigliano V.A., Cank K.B., Todd D.A., Knowles S.L., Oberlies N.H. Metabolomics-guided

- comparison of pollen and microalgae-based artificial diets in honey bees. *J Agric Food Chem.* 2022; 70(31): 9790-9801. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c02583>.
6. Durdakova M., Kolackova M., Ridoskova A., Cernei N., Pavelicova K., Urbis P., Richtera L., Pelcova P., Adam V., Huska D. Exploring the potential nutritional benefits of *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris*: A focus on vitamin B₁₂, amino acids, and micronutrients. *Food Chem.* 2024; 452: 139434. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139434>.
7. Aslanbay Guler B., Demirel Z., Imamoglu E. Induction of antioxidant activities of *Arthrospira platensis* and *Chlorella vulgaris* by modified culture conditions. *Bioprocess Biosyst Eng.* 2024; 47(2): 275-287. <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02963-5>.
8. Abdel-Tawwab M., Khalil R.H., Abo Selema T.A.M., Elsamanooudy S.I, El-Werwary S.O.M., Shady S.H.H, Monier M.N., Ismaiel M.M.S. Dietary *Chlorella vulgaris* effectively alleviates oxidative stress, immunosuppression, and enhances the resistance to *Streptococcus agalactiae* infection in cadmium-intoxicated Nile tilapia fingerlings. *Fish Shellfish Immunol.* 2023; 136: 108717. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2023.108717>.
9. Conde T.A., Neves B.F., Couto D., Melo T., Neves B., Costa M., Silva J., Domingues P., Domingues M.R. Microalgae as sustainable bio-factories of healthy lipids: Evaluating fatty acid content and antioxidant activity. *Mar Drugs.* 2021; 19(7): 357. <https://doi.org/10.3390/md19070357>.
10. Panova N., Gerasimova A., Todorova M., Pencheva M., Dincheva I., Batovska D., Gledacheva V., Slavchev V., Stefanova I., Nikolova S., et al. Metabolite signatures and particle size as determinants of anti-inflammatory and gastrointestinal smooth muscle modulation by *Chlorella vulgaris*. *Foods.* 2025; 14(19): 3319. <https://doi.org/10.3390/foods14193319>.
11. Yu M., Chen M., Gui J., Huang S., Liu Y., Shentu H., He J., Fang Z., Wang W., Zhang Y. Preparation of *Chlorella vulgaris* polysaccharides and their antioxidant activity in vitro and in vivo. *Int J Biol Macromol.* 2019; 137: 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.222>.
12. Prabakaran G., Moovendhan M., Arumugam A., Matharasi A., Dineshkumar R., Sampathkumar P. Evaluation of chemical composition and in vitro antiinflammatory effect of marine microalgae *Chlorella vulgaris*. *Waste Biomass- Valorization* 2018; 10: 3263-3270. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0370-2>.
13. Zhang R., Ge M., Hu M., Zhao Y., Chong B., Li W., Yu J., Lu Y., He S., Wang J., Yue J., Chen H.N., Xu H., Peng Y., Lei P., Liu Z., Dai L. Magnesium deficiency accelerates gut aging and increases susceptibility to colitis. *Aging Cell.* 2026; 25(3): e70446. <https://doi.org/10.1111/accel.70446>.
14. Orhan C., Er B, Deeh P.B.D., Bilgic A.A., Ojalvo S.P., Komorowski J.R., Sahin K.

Different sources of dietary magnesium supplementation reduces oxidative stress by regulation Nrf2 and NF- κ B signaling pathways in high-fat diet rats. *Biol Trace Elem Res.* 2021; 199(11): 4162-4170. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02526-9>.

15. da Silva Lima F., da Rocha Romero A.B., Hastreiter A., Nogueira-Pedro A., Makiyama E., Colli C., Fock R.A. An insight into the role of magnesium in the immunomodulatory properties of mesenchymal stem cells. *J Nutr Biochem.* 2018; 55: 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2018.02.006>.

16. Abdelrahman A.M., Mohammed A.A., Badawy M.M.M., El Bassuony W.I. Orange peels and *Chlorella vulgaris* supplementation ameliorate gamma radiation-induced oxidative stress by regulating TGF- β and NOX2/NOX4 signaling pathways. *Cell Biochem Funct.* 2023; 41(8): 1263-1274. <https://doi.org/10.1002/cbf.3861>.

17. Farage A.E., Abdel-Kareem M.A., Taha M., Abubakr S., Helal N.E., Hendawy M., Elgendy H.A., Elmetwally A.A., Mahfouz H., Baokbah T.A.S., Rabei M.R., Hossain M.A., Helal A.I., Ibrahim M.M.. Protective effect of *Chlorella vulgaris* against experimental hepatic ischemia reperfusion injury downregulating oxidative stress, inflammation, and apoptosis. *Anat Cell Biol.* 2025; 58(3): 460-472. <https://doi.org/10.5115/acb.24.318>.

18. Almutairi L.A., Abdelghaffar E.G., Hafney H.A., Ebaid H.M., Alkhodair S.A., Shaalan A.A.M., EL-Hak H.N.G. Protective impacts of *Chlorella vulgaris* on cisplatin-induced toxicity in liver, kidney, and spleen of rats: Role of oxidative stress, inflammation, and Nrf2 modulation. *Life.* 2025; 15(6): 934. <https://doi.org/10.3390/life15060934>.

19. Mueller J., van Muilekom D.R., Ehlers J., Suhr M., Hornburg S.C., Bang C., Wilkes M., Schultheiß T., Maser E., Rebl A., Goldammer T., Seibel H., Schulz C. Dietary *Chlorella vulgaris* supplementation modulates health, microbiota and the response to oxidative stress of Atlantic salmon. *Sci Rep.* 2024; 14(1): 23674. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72531-8>.

20. Chiu H.F., Lee H.J., Han Y.C., Venkatakrishnan K., Golovinskaia O., Wang C.K. Beneficial effect of *Chlorella pyrenoidosa* drink on healthy subjects: A randomized, placebo-controlled, double-blind, cross-over clinical trial. *J Food Biochem.* 2021; 45(4): e13665. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13665>.

21. Velankanni P., Go S.H., Jin J.B., Park J.S., Park S., Lee S.B., Kwon H.K., Pan C.H., Cha K.H., Lee C.G. *Chlorella vulgaris* modulates gut microbiota and induces regulatory T cells to alleviate colitis in mice. *Nutrients.* 2023; 15(15): 3293. <https://doi.org/10.3390/nu15153293>.

22. Zhang R., Chen J., Mao X., Qi P., Zhang X. Anti-inflammatory and anti-aging evaluation of pigment-protein complex extracted from *Chlorella Pyrenoidosa*. *Mar Drugs.* 2019; 17 (10): 586. <https://doi.org/10.3390/md17100586>.

23. Sibi G., Rabina S. Inhibition of pro-inflammatory mediators and cytokines by *Chlorella*

- vulgaris extracts. Pharmacognosy Res. 2016; 8(2): 118-122. <https://doi.org/10.4103/0974-8490.172660>.
24. Yoon J.H., Do J.S., Velankanni P., Lee C.G., Kwon H.K. Gut microbial metabolites on host immune responses in health and disease. Immune Netw. 2023; 23(1): e6. <https://doi.org/10.4110/in.2023.23.e6>.
25. Makipour A., Hosseinifar S., Khazaeel K., Tabandeh M.R., Jamshidian J. Protective effect of *Chlorella vulgaris* on testicular damage, sperm parameters, androgen production, apoptosis and oxidative stress index in male rats following doxorubicin administration. Reprod Toxicol. 2024; 128:108653. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2024.108653>.
26. Embaby M.A., Haggag E.A., El-Sheikh A.S., Marrez D.A. Biosorption of Uranium from aqueous solution by green microalga *Chlorella sorokiniana*. Environ Sci Pollut Res Int. 2022; 29(38): 58388-58404. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19827-2>.
27. Scasna M., Kucmanova A., Sirotiak M., Blinova L., Soldan M., Hajzler J., Duriska L., Palcut M. *Chlorella vulgaris*-derived biochars for metribuzin removal: Influence of thermal processing pathways on sorption properties. Materials (Basel). 2025; 18(14): 3374. <https://doi.org/10.3390/ma18143374>.
28. Mungunkhuyag K., Steingroewer J., Walther T., Krujatz F. Isolation and characterization of heavy metal tolerant microalgae from old mining areas of Saxony. Sci Rep. 2026; 16(1): 1337. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32393-0>.
29. Yadav M., Kumar V., Sandal N., Chauhan M.K. Quantitative evaluation of *Chlorella vulgaris* for removal of toxic metals from body. Journal of Applied Phycology. 2022; 34(6): 2743-2754. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02640-8>.
30. Eissa M.M., Ahmed M.M., Abd Eldaim M.A., Mousa A.A., Elkirdasy A.F., Mohamed M.A., Orabi S.H. *Chlorella vulgaris* ameliorates sodium nitrite-induced hepatotoxicity in rats. Environ Sci Pollut Res Int. 2021; 28(8): 9731-9741. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11474-9>.
31. Arafa S.S., Adel M., Abdelzaher O.F., Alfawaz S.A., Nooreldien N.M., Mohamed R.Y.A., Abd El-Azez A.M., Abd El-Gawwad H.A., El-Sharkawy S.M., Sweed E., Abdelsattar S., El-Dahshan A.A., AbdRabou M.A., Abdelrahman D.S., Atwa A.M., El-Saeed E.I., Demerdash F. Prenatal exposure to the fungicide flutolanil induces developmental and hepatic toxicity in pregnant rats and their fetuses: Insights from in vivo and in silico studies and the protective role of *Chlorella vulgaris*. Reprod Toxicol. 2026; 141: 109203. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2026.109203>.
32. Eissa M.M., Ahmed M.M., Abd Eldaim M.A., Orabi S.H., Elbaz H.T., Mohamed M.A., Elweza A.E., Mousa A.A. Methanolic extract of *Chlorella vulgaris* protects against sodium nitrite-induced reproductive toxicity in male rats. Andrologia. 2020; 52(11): e13811.

<https://doi.org/10.1111/and.13811>.

33. Abdel-Aziem S.H., Abd El-Kader H.A.M., Ibrahim F.M., Sharaf H.A., El Makawy A.I. Evaluation of the alleviative role of *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* extract against ovarian dysfunctions induced by monosodium glutamate in mice. *J Genet Eng Biotechnol*. 2018; 16(2): 653-660. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2018.05.001>.
34. Farag M.R., Alagawany M., Mahdy E.A.A., El-Hady E., Abou-Zeid S.M., Mawed S.A., Azzam M.M., Crescenzo G., Abo-Elmaaty A.M.A. Benefits of *Chlorella vulgaris* against cadmium chloride-induced hepatic and renal toxicities via restoring the cellular redox homeostasis and modulating Nrf2 and NF-KB pathways in male rats. *Biomedicines*. 2023; 11(9): 2414. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11092414>.
35. Farag M.R., El-Naseery N.I., El Behery E.I., Nouh D.S., El-Mleeh A., Mostafa I.M.A., Alagawany M., Di Cerbo A., Azzam M.M., Mawed S.A. The Role of *Chlorella vulgaris* in attenuating infertility induced by cadmium chloride via suppressing oxidative stress and modulating spermatogenesis and steroidogenesis in male rats. *Biol Trace Elem Res*. 2024; 202(9): 4007-4020. <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03971-y>.
36. Giambastiani L., Fiorentino S., Brady K., Raffaelli A., Bramanti E., Lorenzini E.C., Longo V., Sparvoli F., Pozzo L., Vornoli A. Toxicological assessment of *Chlorella vulgaris* and its potential preventive effect in a chronic obstructive pulmonary disease (COPD) mouse model. *Front Toxicol*. 2025; 7: 1654583. <https://doi.org/10.3389/ftox.2025.1654583>.
37. Ilavenil S., Kim D.H., Vijayakumar M., et al. Potential role of marine algae extract on 3T3-L1 cell proliferation and differentiation: An in vitro approach. *Biol Res*. 2016; 49: 38. <https://doi.org/10.1186/s40659-016-0098-z>.
38. Roueintan M., Koohpeyma F., Naseri A., Mahdavi A., Keyghobadi H., Karamibonari A.R., Dastghaib S. Protective effects of *Lactobacillus casei* and *Chlorella vulgaris* on cardiac gene expression (*NF-κB*, *Nrf-2*) and structural alterations in a *C57BL/6* mouse model of MASLD. *J Diabetes Metab Disord*. 2025; 24(2): 259. <https://doi.org/10.1007/s40200-025-01775-6>.
39. Okada H., Yoshida N., Kakuma T., Toyomasu K. Effect of *Chlorella* ingestion on oxidative stress and fatigue symptoms in healthy men. *Kurume Med J*. 2018; 64(4): 83-90. <https://doi.org/10.2739/kurumemedj.MS644001>.
40. Hussein H.J.S., Naji S.S., Al-Khafaji S.M.N. Antibacterial properties of the *Chlorella vulgaris* isolated from polluted water in Iraq. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2018; 10(10): 2457-2460. URL: <https://cdnx.uobabylon.edu.iq/research/gm27AVcwc0OrZ2hFfviiCw.pdf>
41. Ouzakar S., Skali Senhaji N., Rigano F., Cafarella C., Kounnoun A., Cacciola F., Abrini J. *Chlorella vulgaris* as a producer of lipids for antibacterial, antibiofilm and antifungal

- properties. Nat Prod Res. 2026; 40 (11): 3230-3238. <https://doi.org/10.1080/14786419.2025.2462115>.
42. Sampathkumar S. J., Srivastava P., Ramachandran S. [et al.]. Lutein: A potential antibiofilm and antiquorum sensing molecule from green microalga *Chlorella pyrenoidosa*. Microbial Pathogenesis. 2019; 135: 103658. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2019.103658>.
43. Gumerov T. Y., Freze T.Y., Gabdukaeva L. Z. Ensuring safety during the work with mercury and its inorganic salts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020; 962 (4): 42033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042033>.
44. Uribe-Wandurraga Z.N., Igual M., García-Segovia P., Martínez-Monzó J. Effect of microalgae addition on mineral content, colour and mechanical properties of breadsticks. Food & Function. 2019; 10 (8): 4685-4692. <https://doi.org/10.1039/C9FO00286C>.
45. Tohamy M.M., Ali M.A., Shaaban H.A., Mohamad A.G., Hasanain A.M. Production of functional spreadable processed cheese using *Chlorella vulgaris*. Acta Sci Pol Technol Aliment. 2018; 17(4): 347-358. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.0589>.
46. Pehlivan A.D., Yadel İ., Kılıç N., Öztürk H. İ. The incorporation of *Chlorella vulgaris* and *Chondrus crispus* algae in the production of functional ayran drinks: Effects on physicochemical, microbiological, and sensory characteristics. Journal of Food Measurement and Characterization. 2023; 17(3): 3019-3032. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-01840-9>.
47. Iriani D., Putra H.S., Hasan B. [et al.] Diversification of cocoa drinks with *Chlorella vulgaris* hydrolysate as a functional innovation for health benefits. Asian Journal of Dairy and Food Research. 2025. <https://doi.org/10.18805/ajdfr.DRF-488>.
48. Nishimoto Y., Nomaguchi T., Mori Y., Ito M., Nakamura Y., Fujishima M., Murakami S., Yamada T., Fukuda S. The nutritional efficacy of *Chlorella* supplementation depends on the individual gut environment: A randomised control study. Front Nutr. 2021; 8: 648073. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.648073>.
49. Ribeiro D.M., Coelho D., Osório H., Martins C., Bengala Freire J.P., Almeida J., Moreira O., Almeida A.M., Prates J.A.M. Effect of dietary incorporation of *Chlorella vulgaris* and CAZyme supplementation on the hepatic proteome of finishing pigs. J Proteomics. 2022; 256: 104504. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2022.104504>.
50. Lopes P.A., Coelho D, Prates JAM. Testimony on a successful lab protocol to disrupt *Chlorella vulgaris* microalga cell wall. PLoS One. 2022; 17(5): e0268565. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268565>.
51. Coelho D., Ribeiro D., Osório H., de Almeida A.M., Prates J.A.M. Integrated Omics analysis of pig muscle metabolism under the effects of dietary *Chlorella vulgaris* and

exogenous enzymes. Sci Rep. 2022; 12(1): 16992. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21466-z>.

52. Khvoynikov A.N., Sangalova E.D., Orlova O.Yu. Trends and statistics of the microalgae market development. Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava. 2021; (4-2): 278-282. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/vaael.1678>.

53. Microalgae Market. Report ID: 423570. 2025. Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/ru/product/microalgal-powder-market/> Accessed May 4, 2026. (In Russ.)

54. The Russian Algae Industry: Development Prospects and Industry Potential: Scientific and Practical Conference. Federal Research Center of Nutrition and Biotechnology; 2026. URL: <https://ion.ru/news/vodoroslevaya-industriya-rossii-perspektivy-razvitiya-i-otraslevoy-potentsial/>. Accessed June 23, 2026. (In Russ.)

Информация об авторах

Наталья Александровна Гертан – младший научный сотрудник отдела токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург, e-mail: gertan00@mail.ru; тел.: 8 (343) 253-11-05, ORCID iD: 0009-0008-3239-5998).

Ильзира Амировна Минигалиева – доктор биологических наук, заведующая отделом токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург); главный научный сотрудник лаборатории стохастического транспорта наночастиц в живых системах ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620062, г. Екатеринбург); e-mail: ilzira@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 253-12-85. ORCID iD: 0000-0002-0097-7845.

Марина Петровна Сутункова – доктор медицинских наук, директор ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, Екатеринбург); зав. кафедрой гигиены и медицины труда ФГБОУ ВО УГМУ Министерства здравоохранения Российской Федерации, (620028, Екатеринбург), e-mail: sutunkova@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 253-12-85. ORCID iD: 0000-0002-1743-7642.

Полина Дмитриевна Куляшова – лаборант-исследователь отдела токсикологии и биопрофилактики ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, г. Екатеринбург, e-mail: pkulyashova@gmail.com; тел.: 8 (343) 253-11-05, ORCID iD: 0009-0004-9184-2779).

Владимир Борисович Гурвич – доктор медицинских наук, научный руководитель ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, Екатеринбург, e-mail: gurvich@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 371-12-02, ORCID iD: 0000-0002-6475-7753)

Татьяна Васильевна Мажаева – кандидат медицинских наук, заведующий отделом гигиены питания, качества и безопасности продукции ФБУН ЕМНЦ ПОЗРПП Роспотребнадзора (620014, Екатеринбург, e-mail: mazhaeva@ymrc.ru; тел.: 8 (343) 371-13-30, ORCID iD: 0000-0002-8566-2446).

Author Information

Natalia A. Gertan – Junior Researcher, Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: gertan00@mail.ru; tel.: +7 (343) 253-11-05, ORCID iD: 0009-0008-3239-5998.

Ilzira A. Minigalieva – Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); Chief Researcher, Laboratory of Stochastic Transport of Nanoparticles in Living Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (620062, Yekaterinburg); e-mail: ilzira@ymrc.ru; tel. +7 (343) 253-12-85; ORCID iD: 0000-0002-0097-7845.

Marina P. Sutunkova – Doctor of Medical Sciences, Director, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); Head of the Department of Occupational Hygiene and Medicine, Ural State Medical University (620028, Yekaterinburg); e-mail: sutunkova@ymrc.ru; tel. +7 (343) 253-12-85; ORCID iD: 0000-0002-1743-7642.

Polina D. Kulyashova – Laboratory Research Assistant, Department of Toxicology and Bioprophylaxis, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: pkulyashova@gmail.com; tel.: +7 (343) 253-11-05; ORCID iD: 0009-0004-9184-2779.

Vladimir B. Gurvich – Doctor of Medical Sciences, Scientific Director, Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers (620014, Yekaterinburg); e-mail: gurvich@ymrc.ru; tel.: +7 (343) 371-12-02; ORCID iD: 0000-0002-6475-7753.

Tatyana V. Mazhaeva – Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of Nutrition Hygiene, Food Quality and Safety (620014, Yekaterinburg); e-mail: mazhaeva@ymrc.ru; tel.: +7 (343) 371-13-30; ORCID iD: 0000-0002-8566-2446.

Поступила/Received: 23.06.2026

Принята в печать/Accepted: 14.08.2026