

Пищевые системы

Food Systems

Научная статья

УДК 574.52:57.014

doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-83-93

**Оценка окислительно-восстановительных свойств и механизмов
диффузии экстрактов, имеющих альгиновые биогели****Анна Тимофеевна Васюкова^{✉1,2}, Марина Дмитриевна Веденяпина³,
Евгений Юрьевич Латышев²**¹Российский государственный университет народного хозяйства имени В. И. Вернадского, Шоссе Энтузиастов, д. 50, Балашиха, Московская область, Россия, 143907²Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Волоколамское шоссе, д. 11, Москва, Россия, 125080³Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН, Ленинский проспект, д. 47, Москва, Россия, 119334^{✉1}Vasyukova-at@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7374-4145>²mvedenyapina@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5348-8618>³jack77793@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1409-4007>

Аннотация. Полученные в многочисленных исследованиях результаты окислительно-восстановительного состояния различных сред (альгиновых биогелей, водных экосистем, коллоидных дисперсных и эмульсионных систем) позволяют лучше оценить механизмы и выявлять особенности их стабильности. Дисперсность стабилизируемых эмульсий зависит от размера частиц, энергии их адсорбции на межфазной поверхности. Молекулы поверхностно-активных веществ, наночастицы, могут как адсорбироваться на межфазной поверхности, так и десорбироваться. Наночастицы дезамидированного глина и дубильной кислоты стабилизируют эмульсию с высоким содержанием внутренней фазы. Выявлены зависимости инвертных эмульсий от полярной жидкости (воды). Установлена стабильность эмульсий, полученных с применением синтезированных эмульгаторов. Альгиновые биогели стабилизируют структуру студней и увеличивают вязкость этих систем. Использование биогелей в эмульсионных средах сообщает им стойкость и нераспадаемость длительный период. Получение микрочастиц данного геля в структуре студня или эмульсии незначительное, поскольку концентрация использованного На-альгината остается постоянной. Целью работы являлось изучение окислительно-восстановительных свойств и механизмов диффузии экстрактов, имеющих альгиновые биогели. Материалы и методы исследования: Рабочие растворы были приготовлены на дистиллированной воде. Для исследований использовались водные и спиртовые ультразвуковые экстракты водорослей (фукуса, хлореллы, спиролины). Методом циклической вольтамперометрии (ЦВА) определены редокс-свойства анализируемого вещества в водной среде. Содержание сухих веществ определяли рефрактометрическим методом на рефрактометре ИРФ-454 Б2М. Оценены окислительно-восстановительные свойства, механизмы заряда-разряда и электрохимическая стабильность экстрактов, в состав которых входят альгиновые биогели. Установлено, что использование различных водорослей (фукуса, хлореллы, спиролины), содержащих На-альгинат, позволяет получить спиртовые и водные экстракты различной степени насыщенности пищевыми и биологически активными веществами. Наиболее эффективным был способ ультразвуковой экстракции, позволяющий в течение 30 минут получить насыщенные экстракты трех видов водорослей. Методом ЦВА определены параметры окислительно-восстановительных реакций органических соединений в исследуемых водных экстрактах.

Ключевые слова: ультразвуковой экстракт, водоросли, редокс свойства, циклическая вольтамперометрия, биогели

Для цитирования. Васюкова А. Т., Веденяпина М. Д., Латышев Е. Ю. Оценка окислительно-восстановительных свойств и механизмов диффузии экстрактов, имеющих альгиновые биогели // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 1(47). С. 83–93. doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-83-93

Original article

Evaluation of oxidation-reduction properties and diffusion mechanisms of extracts containing alginic biogels

Anna T. Vasyukova^{✉1,2}, Marina D. Vedenyapina³, Evgeny Yu. Latyshev²

¹Vernadsky Russian State University of National Economy, 50 Shosse Entuziastov, Balashikha, Moscow region, Russia, 143907

²Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH), 11 Volokolamskoe Shosse, Moscow, Russia, 125080

³N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, 47 Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119334

^{✉1}Vasyukova-at@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7374-4145>

²mvedenyapina@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5348-8618>

³jack77793@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1409-4007>

Abstract. The results of the oxidation-reduction state of various media (algin biogels, aquatic ecosystems, colloidal dispersed and emulsion systems) obtained in numerous studies allow us to better evaluate the mechanisms and identify the features of their stability. The dispersion of stabilized emulsions depends on the particle size, the energy of their adsorption on the interfacial surface. Molecules of surfactants, nanoparticles, can both be adsorbed on the interphase surface and desorbed. Nanoparticles of deamidated gliadin and tannic acid stabilize an emulsion with a high content of the internal phase. Dependences of invert emulsions on a polar liquid (water) are revealed. Stability of emulsions obtained using synthesized emulsifiers is established. Alginic biogels stabilize the structure of jellies and increase the viscosity of these systems. The use of biogels in emulsion media imparts stability and non-separation to them for a long period. Obtaining microparticles of this gel in the structure of jelly or emulsion is insignificant, since the concentration of the used Na-alginate remains constant. The aim of the work was to study the oxidation-reduction properties and diffusion mechanisms of extracts containing alginic biogels. Materials and methods of research: Working solutions were prepared in distilled water. Aqueous and alcoholic ultrasonic extracts of algae (fucus, laminaria, chlorella) were used for the studies. The electrochemical properties of the analyzed substance in solution were determined by cyclic voltammetry (CVA). The dry matter content was determined by refractometric method on an IRF-454 B2M refractometer. The oxidation-reduction properties, charge-discharge mechanisms and electrochemical stability of extracts containing alginic biogels were estimated. It was found that the use of various algae (fucus, laminaria, chlorella) containing Na-alginate allows obtaining alcohol and water extracts of varying saturation with food and biologically active substances. The most effective method was ultrasonic extraction, allowing saturated extracts of three algae species to be obtained within 30 minutes. The concentration of dry substances in all samples obtained by ultrasonic extraction exceeds that of samples with water extraction. The same dependence is noted in the color intensity of all samples. The CVA method revealed oxidative instability of organic compounds in the studied aqueous extracts.

Keywords: ultrasonic extract, algae, redox properties, cyclic voltammetry, biogels

For citation. Vasyukova A.T., Vedenyapina M.D., Latyshev E.Yu. Evaluation of oxidation-reduction properties and diffusion mechanisms of extracts containing alginic biogels. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2025;1(47):83–93. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-83-93

Введение. Микроводоросли – очень разнообразные фотосинтетические организмы с более высокой скоростью роста и простыми потребностями в питании. Они эволюционировали с эффективностью адаптации к широкому диапазону условий окружающей среды, что приводит к генетическому разнообразию. Водоросли составляют почти половину мирового фотосинтеза, что делает их важнейшими игроками в секвестрации CO₂. Кроме того, они обладают метаболическими способностями производить новые вторичные метаболиты фармацевтического, нутрицевтического и промышленного назначения (Kato, 2021) [1]. Существует множество проблем в генной инженерии, связанных с большим разнообразием водорослей, но многочисленные применения вторичных метаболитов делают эту область исследований очень важной для биотехнологической промышленности.

Микроводоросли – эукариотические организмы, которые эволюционировали в результате серии первичных и вторичных эндосимбиозов (Fu et al., 2019) [2]. Они распространены повсеместно в природе и адаптированы к широкому спектру условий окружающей среды. Микроводоросли считаются наиболее перспективным сырьем для производства метаболитов из-за их более высокой скорости роста, производства биомассы и простоты культивирования. Однако повышение продуктивности зависит от ряда параметров, включая интенсивность освещения и потребность в питательных веществах, которая варьируется в зависимости от вида и целевого метаболита (Gimpel, J.A., 2015) [3]. Водоросли широко используются в качестве структурообразователей, загустителей, в производстве противомикробных препаратов, фотозащитных средств, биопластиков (Bajhaiya, A.K., 2017; Bajhaiya, A.K., Sriniketanam, A., 2021) [4, 5], противовирусных препаратов и т.д. (Fu et al., 2019) [2].

Социально-экономическое значение ламинарии восходит к древнейшим временам в истории человечества (Erlandson et al., 2007) [6]. Потребление морских водорослей в пищу восходит к эпохе викингов в Норвегии (Mouritsen et al., 2013) [7], и они остаются традиционной пищей для некоторых прибрежных общин Скандинавии, в Японии, а также для народов инуитов и саамов

(Wernberg et al., 2019) [8]. Древние люди знали, что биомасса морских водорослей является богатым источником питания даже для животных, и их потребление, возможно, помогло первым колонизаторам американского континента путешествовать вдоль Тихоокеанского побережья по «Шоссе из водорослей» (Erlandson et al., 2007) [6]. Более того, считается, что потребление морской пищи, богатой жирными кислотами омега-3 и другими необходимыми питательными веществами, могло помочь развитию человеческого мозга у ранних предков Homo (Cornish M.L., et al., 2017) [9]. Водоросли также остались частью культуры и истории этих прибрежных народов, передаваясь через устную традицию, как одно из важнейших божеств в мифе маори: Хине-нуи-(и)-те-по. Хине-нуи-(и)-те-по, или «Великая леди ночи», считается королевой подземного мира, и ее описывают как имеющую глаза из зеленого камня, волосы, похожие на водоросли, зубы, похожие на обсидиан, и рот, похожий на барракуду (Perris, S. 2018) [10].

Известны также морские салат и виноград, которые относятся к хлорофитам. Они широко популярны в Японии и Азии. В этих странах из зеленых водорослей готовят супы и салаты в большом ассортименте [8, 11].

К семейству феофитов относятся вакаме, араме, хидзики и ламинарии. Блюда, приготовленные из вакаме, обладают нежным и приятным вкусом. Ламинария содержит альгиновые биогели в больших концентрациях, что позволяет ее использовать в качестве структурообразователя и загустителя в кулинарной практике. Наиболее популярна водоросль у японцев – комбу. Благодаря этой водоросли кулинары обеспечивают блюдам уникальный вкус умами [6, 12].

Красные водоросли (родофиты) включают в себя обычно употребляемые в пищу водоросли, такие как нори, дульс и ирландский мох. Нори повсеместно в азиатской и японской кухне применяют в качестве ингредиентов суши-роллов. Отличаются эти водоросли уникальной цветовой гаммой, которую сообщает им пигмент – фикоэритрин [11, 12].

К семейству микроводорослей относятся сине-зеленые водоросли и цианобактерии [13]. Они отличаются высокой концентрацией полисахаридов и фенольных веществ [14]. Применяют данные водоросли в кулинарии и

фармации [15]. К данной группе относится и хлорелла [16], которая отличается белково-полисахаридным комплексом и витаминно-минеральным составом [17, 18]. Для использования в терапевтических целях из нее готовят препараты в виде жидкости или порошка.

Важным является выявление функционально-технологических свойств в рассматриваемой группе фототрофных организмов, которые можно целенаправленно использовать при изготовлении различных кулинарных изделий. Для новой продукции важны не только пищевая ценность, калорийность, вкусовые достоинства, но и внешний вид. Альгиновые биогели могут выступать отличными структурообразователями при изготовлении низкокалорийных майонезов и мясных эмульсий в колбасном производстве. Ламинария используется в качестве ингредиента в технологии закусок, супов, салатов и горячих блюд. Спирулина используется в десертах и кондитерских изделиях в качестве красителя – зеленого цвета. Наиболее полно водоросли раскрыты в азиатской кухне. Это достаточно широкий перечень блюд и кулинарных изделий.

Цель исследования – оценка окислительно-восстановительных свойств и механизмов диффузии экстрактов, имеющих альгиновые биогели.

Материалы, методы и объекты исследования. Объектами исследования были водные и спиртовые ультразвуковые экстракты фукуса, хлореллы и спирулины, содержащие альгиновые биогели. Рабочие растворы были приготовлены на дистиллированной воде.

Окислительно-восстановительные свойства экстрактов определяли методом циклической вольтамперометрии (ЦВА). Во время эксперимента с определённой скоростью потенциал изменяется от одного значения к другому и обратно. Полученная вольтамперограмма представляется в координатах «ток–потенциал». Молекулы исследуемого раствора адсорбируются на электроде.

Исследование выполнено в диапазоне от – 2050 до + 2000 (Е, мВ) милливольт. Определены потенциалы редокс-процессов. Карбонат калия имел квалификацию «ч.д.а.». Использованы также рабочие растворы с сульфатом. Показатели ЦВА отмечали прибором ІРС Сомраст через компьютер. Рабочим электродом выбрана золотая проволока, впаянная

в стекло, $\varnothing$ 0,3 мм и $l = 0,3$ см. Вспомогательный электрод – платиновая проволока $\varnothing$ 0,3 мм и $l = 0,3$ см, впаянная в стекло. Электрод сравнения – Ag/AgCl/3М КСl. Объем рабочего раствора 20 мл. В качестве фонового электролита 0,05 М раствор K_2CO_3 с рН 11,1 (табл. 1).

Таблица 1. Влияющие факторы процесса окисления водных вытяжек водорослей
Table 1. Influencing factors of the oxidation process of aqueous extracts of algae

Наименование показателей	Значения показателей
Вещество	Спиртовая вытяжка/ водная вытяжка
Рабочий раствор	карбонат/сульфат + вытяжка = 1:1
Объем рабочего раствора, V	4 мл
Рабочий электрод, W	Au проволока, $d \approx 2$ мм
Противоэлектрод, C	Pt, $d = 0,5$ мм
Электрод сравнения, R	Ag-AgCl 3М

Метод ЦВА заключается в регистрации зависимости тока от потенциала, изменяющегося во времени по линейному закону [19].

Результаты исследования. Использование ультразвуковой установки, основанной на ультразвуковом методе экстракции (ОАЭ) (Квасенков О. И. и др., 1994) спиртовых экстрактов из водорослевого сырья, позволил приготовить насыщенный раствор экстрактов. Механизм получения спиртовой вытяжки из фукуса, хлореллы и спирулины основан на эффекте сильной кавитации, которая возникает вследствие возмущения и высокого ускорения, создаваемого ультразвуком. Функция разрушения и смешивания многоступенчатого эффекта, создаваемого давлением ультразвукового излучения, которое является частью потерь механической энергии жидкости в процессе экстракции, увеличивает частоту и скорость молекулярного движения микрочастиц водорослей, увеличивает проникновение этилового спирта, повышает концентрацию целевого компонента в растворе и способствует извлечению пищевых

и пигментоокрашенных веществ из водорослей в экстракт. Когда ультразвуковые волны проходят через матрицу, они вызывают последовательность колебаний сжатия и разрежения. Эти колебания передаются через твердую, жидкую или газовую среду, в результате чего молекулы смещаются и вытесняются из их первоначальных мест (паренхимной ткани) сырья растительного происхождения (водорослей). Это приводит к дополнительному уменьшению полной механической энергии потока жидкости на выходе из ультразвуковой системы (Руденко М. Г., 2006). Градиент давления во время разрежения превосходит силу притяжения, связывающую молекулы вместе, разделяя их и образуя акустическую кавитацию при давлении высокой интенсивности (McDonnell & Tiwari, 2017). Кавитация происходит, когда статическое давление жидкости падает ниже давления пара, образуя заполненные паром полости. В результате применения ультразвуковой кавитации возможно максимальное извлечение экстрактивных веществ из трех исследуемых образцов, установление количественного состава изучаемых мисцелл и определение сублимационных искажений состава экстракта. В процессе кавитации образующиеся "пузыри" или "пустоты" рушатся под высоким давлением и вызывают ударные волны, которые и обеспечивают разрушение клеток растительного сырья. Эта адаптация давления вызывает образование кавитационных пузырьков из ядра матрицы. Одновременно пузыри кавитации продолжают расти, прежде чем они становятся нестабильными и разрушаются в процессе барботирования в экстрактор. Образование, расширение и распад пузырьков в матрице исследовано рядом отечественных и зарубежных ученых (S. He, F. Biedermann, N. Vankova, and all, 2018; Касьянов Г.И. и др., 1996; Рыбалко А.В., 1992; Schneider H.J., 2024). Рассматриваемый процесс может быть объяснен явлением акустической кавитации. Однако здесь нельзя исключить роль гидрофобной гидратации в формировании биологических мембран и в сворачивании белков, а также важность электростатических взаимодействий в гидратации полярных и ионных видов, вытекающих из неравенств Гиббса, которые накладывают строгие энергетические верхние и нижние границы как для сво-

бодных энергий гидратации, так и для энтропий (D. Ben-Amotz, R. Underwood, 2008). Осуществляющийся в процессе ультразвуковой кавитации распад пузырьков воздуха создает высокую температуру и давление, что порождает непроницаемые микропотоки и турбулентные процессы. Эти эффекты в совокупности создают искажение клеточной стенки и диффузию растворителя в матрицу. Растворитель выщелачивает питательные вещества в окружающую среду, обеспечивая процесс экстракции. В результате уменьшения размера частиц и механического воздействия растворитель можно лучше различить, что приводит к увеличению площади поверхности контакта с твердым веществом и жидкостью. Ранее Xie, Huang, Zhang, You & Zhang (2015), выполняя экстракцию биоактивных соединений, получил сопоставимые данные.

Полученные в результате эксперимента спиртовые экстракты фукуса, хлореллы и спирулины исследовали методом циклической вольтамперометрии (ЦВА). Постоянно взаимодействуя с электрическим током, электролиты играют важную роль при определении веществ, диссоциируемых в растворе, которые становятся носителями электрического заряда. Но что делает электролиты проводящими, в то время как обычные вещества, такие как спирты, не проявляют такие свойства? Спирты состоят из гидроксильной группы (-ОН). Несмотря на наличие гидроксильной группы, спирты не делятся на ионы при растворении и поэтому не обладают проводимостью. Гидроксильная группа в данных растворителях не разлагается на (+) и (-) заряженные ионы, так как энергетический барьер для этого процесса очень высок. В этой связи спирты не проводят электричество и не обладают проводимостью электролитов. Но в исследованиях Фомина В. В., Вайнштейна В. А. и других авторов (1999), Шевченко Н. М., Имбс Т. И. и др. (2004), Шепилова В. Г. и Шепиловой Е. А. (2002) сухое растительное сырье экстрагируют одновременно маслом или жиром и водно-спиртовой смесью, а также проводят экстракцию C_2H_5OH с последующим отделением экстракта и его фильтрацией, которые впоследствии исследовали с применением метода ЦВА.

Спиртовые экстракты фукуса, хлореллы и спирулины при изучении механизмов диффузии и окислительно-восстановительных свойств альгиновых биогелей с последующим использованием их в качестве стабилизаторов эмульсий желаемые результаты методом ЦВА

не выявили. Установлено, что интенсивность окраски исследуемых растворов и концентрация сухих веществ во всех образцах высокая. Экстракты насыщенные и интенсивно окрашенные (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2. Физико-химические показатели качества экстрактов, полученные водной и ультразвуковой экстракцией водорослей
Table 2. Physicochemical quality indicators of extracts obtained by water and ultrasonic extraction of algae

Наименование показателя	Контроль	Экстракт фукуса	Экстракт хлореллы	Экстракт спирулины
<i>Водный раствор</i>				
Содержание сухих веществ, %	2,6±0,02	3,2±0,03	2,8±0,02	2,9±0,01
Интенсивность цвета	1,32±0,01	1,83±0,04	1,65±0,02	1,95±0,03
<i>Спиртовой раствор</i>				
Содержание сухих веществ, %	2,8±0,04	4,6±0,02	3,9±0,03	4,1±0,03
Интенсивность цвета	1,44±0,01	1,98±0,01	1,77±0,04	1,99±0,03



Рисунок 1. Ультразвуковые экстракты водорослей: фукус, хлорелла, спирулина
Figure 1. Ultrasonic extracts of algae: fucus, chlorella, spirulina

Поэтому дальнейшие исследования проведены с сухими образцами перечисленных водорослей, которые подвергали измельчению и экстракции горячей водой. Процесс заключался в кипячении измельченных водорослей в течение 10-20 мин при массовом соотношении растительного сырья и воды (1:5)-(1:20), выдерживании полученной смеси 24 часа с последующей фильтрацией и определением показателей качества (табл. 2).

Контролем во всех образцах служил 1%-ный раствор На-альгината.

Известно, что эффективность экстракции всегда оценивается количеством веществ, перешедших из образца в растворитель. Концентрация сухих веществ во всех образцах,

полученных методом ультразвуковой экстракции, превышает образцы с водной экстракцией. Из всех полученных образцов максимальное количество сухих веществ обнаружено в спиртовых экстрактах из фукуса, которые в 1,5 раза превышали водные экстракты. Такая же зависимость наблюдается и по отношению к интенсивности окрашивания экстрактов.

Состав экстрактов включает полифенольные соединения, состоящие из танина, катехинов и их производных, а также агары, альгинаты и каррагинаны. В состав всех экстрактов входят антиоксиданты, пигменты и гормоны. Повышенная концентрация питательных веществ и пигментов очень важна и для производителей пищевой продукции, так как пищевые добавки, используемые при изготовлении блюд и кулинарных изделий, будут более концентрированные, что при равных условиях (требуемому цвету, определенной вязкости, стойкости структуры и пр.) потребует меньшее количество пищевой добавки на основе водорослей.

Результаты исследования окислительно-восстановительных свойств альгиновых биогелей из водорослей приведены в таблице 3 и на рисунке 2.

Таблица 3. Зависимость отношения анодного тока и потенциала редокс процессов
от вида водных экстрактов водорослевых биогелей**Table 3.** Dependence of the ratio of anodic current and redox potential
on the type of aqueous extracts of algal biogels

ФОН		Экстракт фукуса		Экстракт хлореллы		Экстракт спирулины	
E, мВ	I, мА	E, мВ	I, мА	E, мВ	I, мА	E, мВ	I, мА
-72,812	-0,012635	-73,988	0,017088	-74,367	0,017512	-53,626	-0,002853
-53,661	-0,002868	-55,406	0,017512	-55,216	0,017936	-15,918	0,007725
-34,51	0,003501	-36,103	0,017512	-34,434	0,01836	23,777	0,010211
-15,966	0,007746	-15,207	0,018784	-15,473	0,01836	63,559	0,015387
5,0439	0,009441	3,7542	0,019208	3,6785	0,019208	103,07	0,014963
23,777	0,010295	24,422	0,019208	24,157	0,019632	142,82	0,016235
44,711	0,013267	43,384	0,019208	43,043	0,019632	182,83	0,01836
63,559	0,015387	64,204	0,019208	63,976	0,019208	222,61	0,019208
84,378	0,015387	83,089	0,019632	82,596	0,019632	263,87	0,021757
103,07	0,014963	104,02	0,020061	103,79	0,020485	303,84	0,021757
124,2	0,014539	122,68	0,020485	122,68	0,020485	343,47	0,022604
142,82	0,016235	143,61	0,020485	143,5	0,021333	383,29	0,023028
163,83	0,017088	162,69	0,020485	162,23	0,021333	422,95	0,023458
182,83	0,01836	183,51	0,021757	182,98	0,021757	441,50	0,023458
203,57	0,017936	202,21	0,021757	203,99	0,02218	421,48	0,026425
222,61	0,019208	223,1	0,021757	222,72	0,02218	442,37	0,026854
243,31	0,020061	242,06	0,02218	243,65	0,023458	262,88	0,022604
263,87	0,021757	262,88	0,022604	262,5	0,023028	281,62	0,023882
282,79	0,021757	281,62	0,023882	283,32	0,024305	302,28	0,025577
303,84	0,021757	302,28	0,025577	302,21	0,025577	321,32	0,025577
322,57	0,02218	321,32	0,025577	322,99	0,025577	341,91	0,025577
343,47	0,022604	342,18	0,025577	341,91	0,025577	362,62	0,025577
362,51	0,02218	363	0,025577	362,62	0,025577	381,81	0,026425
383,29	0,023028	381,85	0,025577	381,81	0,026425	402,4	0,026854
402,02	0,023458	402,86	0,026001	402,4	0,026854	442,37	0,026854
422,95	0,023458	421,48	0,026425	421,36	0,027702	461,18	0,026854
441,5	0,023458	442,37	0,026854	442,03	0,028126	521,82	0,027702

Максимальный эффект увеличения силы тока и потенциала редокс-процессов наблюдается у экстракта спирулины. В органической среде наблюдается постепенное изменение силы тока. При этом полученные значения экстрактов фукуса, хлореллы и спирулины незначительно разнятся в исследуемом диапазоне.

На рисунке 2 показаны ЦВА водного раствора фукуса и хлореллы.

Фоновая кривая (на диаграмме синего цвета), раствор карбоната калия и кривые ультра-

звуковых экстрактов (вытяжки), полученные при концентрации экстракт: карбонат 1:1. За основу взяли 2 образца ультразвуковых экстрактов водорослей (фукуса, хлореллы). Красная кривая исследуемого образца №1 и синяя кривая фона совпадают. Установлено, что сканирование потенциалов редокс-процессов характеризует суммарное окисление всех органических соединений, находящихся в ультразвуковых экстрактах водорослей. Более интенсивно редокс-процессы протекают в растворе вытяжки хлореллы.

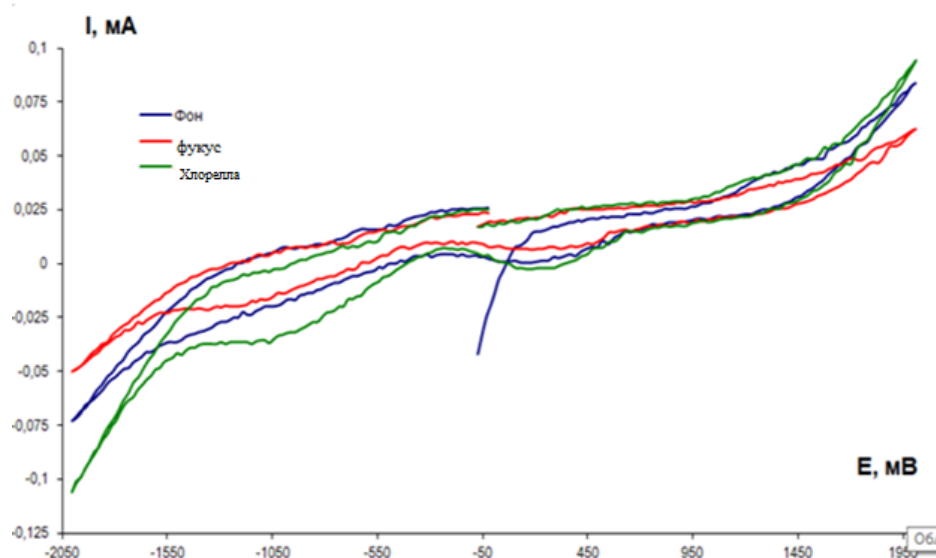


Рисунок 2. Циклические вольтамперограммы, полученные для композиций на основе водных экстрактов фукуса и хлореллы
Figure 2. Cyclic voltammograms obtained for compositions based on aqueous extracts of fucus and chlorella

Выводы. Метод ЦВА дал возможность в указанном диапазоне потенциалов установить процессы окисления-восстановления органических веществ. Сканирование потенциалов редокс-процессов характеризует суммарное окисление всех органических соединений, находящихся в ультразвуковых экстрактах водорослей. Методом ЦВА определены параметры окислительно-восстановительных ре-

акций органических соединений в исследуемых водных экстрактах фукуса, хлореллы и спирулины. Максимальная концентрация пищевых веществ и пигментов, полученная в спиртовых экстрактах с помощью ультразвукового метода экстракции, позволит эффективно использовать их в пищевых технологиях для коррекции функционально-технологических свойств продуктов и цветовой гаммы.

Список литературы

1. Enhancement of carbohydrate redistribution into lipids and carotenoids by disrupting a microalgal starch branching enzyme / Y. Kato, T. Oyama, K. Inokuma [et al.] // Commun. Biol. 2021. Vol. 4. No. 1. P. 450. doi: 10.1038/s42003-021-01976-8
2. Advances in microalgae research and development / W. Fu, D.R. Nelson, A. Mystikou [et al.] // Curr. Opin. Biotechnol. 2019. Vol. 59. Pp. 157–164. doi: 10.1016/j.copbio.2019.05.013
3. Gimpel J.A, Henríquez V., Mayfield S.P. In metabolic engineering of eukaryotic microalgae: potential and challenges comes with great diversity // Front. Microbiol. 2015. Vol. 6. Pp. 1–14. doi: 10.3389/fmicb.2015.01376
4. Bajhaiya A.K., Ziehe Moreira J., Pittman J.K. Transcriptional engineering of microalgae: prospects for high-value chemicals // Trends Biotechnol. 2017. Vol. 35. No. 2. Pp. 95–99. doi: 10.1016/j.tibtech.2016.06.001
5. Sriniketanam A., Bajhaiya A.K. Algae based bioplastics: the future of green economy – biorefineries-sel // Process. Front. Bioeng. Biotechnol. 2021. Vol. 10. P. 836056. doi: 10.3389/fbioe.2022.836056
6. The kelp highway hypothesis: Marine ecology, coastal migration theory, and the peopling of the Americas / J.M. Erlandson, M.H. Graham, B.J. Bourque [et al.] // J. Island Coast. Archaeology. 2007. Vol. 2. No. 2. Pp. 161–174. doi: 10.1080/15564890701628612
7. On the human consumption of the red seaweed dulse (*Palmaria palmata* (L.) Weber & Mohr) / O.G. Mouritsen, K. Dawczynski, L. Duelund [et al.] // J. Appl. Psychol. 2013. Vol. 25. No. 6. Pp. 1777–1791. doi: 10.1007/s10811-013-0014-7
8. Wernberg T., Krumhansl K., Filbee-Dexter K., Pedersen M.F. Status and trends of the world's kelp forests // World seas: an environmental evaluation volume III: ecological issues and environmental impacts. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Academic Press. 2019. Pp. 57–78. doi: 10.1016/B978-0-12-805052-1.00003-6

9. Cornish M.L., Critchley A.T., Mouritsen O.G. Seaweed consumption and the human brain // *J. Appl. Phycology*. 2017. Vol. 29. No. 5. Pp. 2377–2398. doi: 10.1007/s10811-016-1049-3
10. Perris S. What does nine-nui-te-po look like?: An exploration of oral tradition, myth and literature in Aotearoa New Zealand // *J. Polynesian Soc.* 2018. Vol. 127. No. 4. Pp. 365–388. doi: 10.15286/jps.127.4.365-388
11. Васюкова А. Т., Кривошонок К. В., Сидоренко Ю. И. Биогенные амины в рыбных полуфабрикатах и кулинарных изделиях // *Рыбное хозяйство*. 2022. № 1. С. 95–102. doi: 10.37663/0131-6184-2022-1-95-102. EDN: FYHCTL
12. Влияние БАД на потребительские свойства функционального фарша / А. Т. Васюкова, И. У. Кусова, К. В. Кривошонок, Р. А. Эдвардс, М. Талби // *Товаровед продовольственных товаров*. 2022. № 3. С. 174–179. doi: 10.33920/igt-01-2203-03. EDN: RTRWEI
13. Edible microalgae and their bioactive compounds in the prevention and treatment of metabolic alterations / S. Ramos-Romero, J.R. Torrella, T. Pagès [et al.] // *Nutrients*. 2021. Vol. 13. No. 2. P. 563. doi: 10.3390/nu13020563
14. Leandro A., Pereira L., Gonçalves A.M.M. Diverse applications of marine macroalgae // *Mar Drugs*. 2019. Vol. 18. No. 1. P. 17. doi: 10.3390/md18010017
15. Algal proteins: production strategies, nutritional and functional properties / P. Geada, S. Moreira, M. Silva [et al.] // *Bioresource Technologies* 2021. Vol. 332. P. 125125. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125125
16. Kessler E., Hass W.A. Comparative physiology and biochemistry and taxonomic identification of *Chlorella* (*Chlorophyceae*) strains from the University of Texas at Austin culture collection // *J. Phycol.* 1992. Vol. 28. No. 4. Pp. 550–553. doi: 10.1111/j.0022-3646.1992.00550.x
17. Bito T., Okumura E., Fujishima M., Watanabe F. Potential of chlorella as a food supplement to promote human health // *Nutrients*. 2020. Vol. 12. No. 9. P. 2524. doi: 10.3390/nu12092524
18. Insights into cell wall disintegration in *Chlorella vulgaris* / S. Weber, P.M. Grande, L.M. Blank, H. Klose // *PLoS One*. 2022. Vol. 17. No. 1. P. e0262500. doi: 10.1371/journal.pone.0262500
19. Об исследовании электроокислительных процессов методом циклической вольтамперометрии / М. А. Чёрная, С. С. Блинков, А. И. Джумайло [и др.] // *Молодой исследователь Дона*. 2020. № 2(23). С. 73–79. EDN: XAQOVK

References

1. Kato Y., Oyama T., Inokuma K. [et al.]. Enhancement of carbohydrate redistribution into lipids and carotenoids by disrupting a microalgal starch branching enzyme. *Commun. Biol.* 2021;4(1):450. doi: 10.1038/s42003-021-01976-8
2. Fu W., Nelson D.R., Mystikou A. [et al.]. Advances in microalgae research and development. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2019;59:157–164. doi:10.1016/j.copbio.2019.05.013
3. Gimpel J.A., Henríquez V., Mayfield S.P. In metabolic engineering of eukaryotic microalgae: potential and challenges comes with great diversity. *Front. Microbiol.* 2015;6:1–14. doi: 10.3389/fmicb.2015.01376
4. Bajhaiya A.K., Ziehe Moreira J., Pittman J.K. Transcriptional engineering of microalgae: prospects for high-value chemicals. *Trends Biotechnol.* 2017;35(2):95–99. doi: 10.1016/j.tibtech.2016.06.001
5. Sriniketanam A., Bajhaiya A.K. Algae based bio-plastics: future of green economy. In book: *Biorefineries – Vision and Development*. 2021;10:836056. doi: 10.5772/intechopen.100981
6. Erlandson J.M., Graham M.H., Bourque B.J. [et al.]. The kelp highway hypothesis: Marine ecology, coastal migration theory, and the peopling of the Americas. *J. Island Coast. Archaeology*. 2007;2(2):161–174. doi: 10.1080/15564890701628612
7. Mouritsen O.G., Dawczynski K., Duelund L. [et al.]. On human consumption of the red seaweed dulse (*Palmaria palmata* (L.) Weber & Mohr). *J. Appl. Psychol.* 2013;25(6):1777–1791. doi: 10.1007/s10811-013-0014-7
8. Wernberg T., Krumhansl K., Filbee-Dexter K., Pedersen M.F. Status and trends of the world's kelp forests // *World seas: an environmental evaluation volume III: ecological issues and environmental impacts*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Academic Press, 2019. Pp. 57–78. doi: 10.1016/B978-0-12-805052-1.00003-6
9. Cornish M.L., Critchley A.T., Mouritsen O.G. Consumption of seaweeds and the human brain. *J. Appl. Phycology*. 2017;29(5):2377–2398. doi: 10.1007/s10811-016-1049-3
10. Perris S. What does nine-nui-te-po look like?: An exploration of oral tradition, myth and literature in Aotearoa New Zealand. *J. Polynesian Soc.* 2018;127(4):365–388. doi: 10.15286/jps.127.4.365-388
11. Vasyukova A.T., Krivoshonok K.V., Sidorenko Yu.I. Biogenic amines in fish semi-finished products and culinary products. *Fisheries*. 2022;(1):95–102. (In Russ.). DOI: 10.37663/0131-6184-2022-1-95-102. EDN: FYHCTL

12. Vasyukova A.T., Kusova I.U., Krivoshonok K.V. et al. The influence of dietary supplements on the consumer properties of functional minced fish. *Tovarovед prodovol'stvennykh tovarov*. 2022;(3):174–179. (In Russ.). DOI: 10.33920/igt-01-2203-03. EDN: RTRWEI
13. Ramos-Romero S., Torrella J.R., Pagès T. [et al.]. Edible microalgae and their bioactive compounds in the prevention and treatment of metabolic alterations. *Nutrients*. 2021;13(2):563. doi: 10.3390/nu13020563
14. Leandro A., Pereira L., Gonçalves A.M.M. Diverse applications of marine macroalgae. *Mar Drugs*. 2019;18(1):17. doi: 10.3390/md18010017
15. Geada P., Moreira S., Silva M. [et al.]. Algal proteins: production strategies, nutritional and functional properties. *Bioresource Technologies*. 2021;332:125125. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125125
16. Kessler E., Hass W.A. Comparative physiology and biochemistry and taxonomic identification of *Chlorella* (*Chlorophyceae*) strains from the University of Texas at Austin culture collection. *J. Phycol.* 1992;28(4):550–553. doi: 10.1111/j.0022-3646.1992.00550.x
17. Bito T., Okumura E., Fujishima M., Watanabe F. Potential of chlorella as a food supplement to promote human health. *Nutrients*. 2020;12(9):2524. doi: 10.3390/nu12092524
18. Weber S., Grande P.M., Blank L.M., Klose H. Insights into cell wall disintegration in *Chlorella vulgaris*. *PLoS One*. 2022;17(1):e0262500. doi: 10.1371/journal.pone.0262500
19. Chemaya M.A., Blinkov S.S., Dzhumaylo A.I. [et al.]. On research of electro-oxidation processes by the cyclic voltamperometry method. *Molodoy issledovatel' Dona*. 2020;2(23):73–79. (In Russ.). EDN: XAQOVK

Сведения об авторах

Васюкова Анна Тимофеевна – доктор технических наук; профессор кафедры биотехнологий и продовольственной безопасности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет народного хозяйства имени В. И. Вернадского»; профессор кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), SPIN-код: 2889-1457, Scopus ID: 57215827520, Researcher ID: A-7879-2016

Веденяпина Марина Дмитриевна – доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук, SPIN-код: 7744-8145

Латышев Евгений Юрьевич – аспирант кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), SPIN-код: 8404-7718

Information about the authors

Anna T. Vasyukova – Doctor of Technical Sciences; Professor of the Department of Biotechnology and Food Security, V.I. Vernadsky Russian State University of National Economy; Professor of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service, Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH), SPIN-code: 2889-1457, Scopus ID: 57215827520, Researcher ID: A-7879-2016

Marina D. Vedenyapina – Doctor of Chemical Sciences, Leading Researcher, N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences, SPIN-code: 7744-8145

Evgeny Y. Latyshev – Postgraduate Student of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service, Russian Biotechnology University (ROSBIOTECH), SPIN-code: 8404-7718

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author Contributions. All authors of this study were directly involved in the planning and analysis of this study. All authors of this article have read and approved the final version presented.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 28.01.2025;
одобрена после рецензирования 18.02.2025;
принята к публикации 28.02.2025.*

*The article was submitted 28.01.2025;
approved after reviewing 18.02.2025;
accepted for publication 28.02.2025.*