

УДК 54.056; 577.11

## ЭКСТРАКЦИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ *ASCOPHYLLUM NODOSUM* ГЛУБОКИМИ ЭВТЕКТИЧЕСКИМИ РАСТВОРИТЕЛЯМИ

© Т.Э. Скребец\*, Х.Б. Маматмуродов, Н.В. Попов, К.Г. Боголицын

Северный (Арктический) федеральный университет имени  
М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Россия,  
tskrebets@mail.ru

Бурые водоросли, в частности, *Ascophyllum nodosum*, содержат большое количество полезных веществ различной степени полярности, для которых экстракция является одним из основных методов извлечения. В работе проведена экстракция биологически активных веществ (БАВ) из *Ascophyllum nodosum* глубокими эвтектическими растворителями на основе хлорида холина с целью извлечения комплекса биологически активных веществ. Глубокие эвтектические растворители (ГЭР), представляющие собой комбинацию донора и акцептора водородных связей, имеющую более низкую температуру плавления по сравнению с отдельными компонентами, в последнее время составили заметную конкуренцию в качестве экстрагента как классическим растворителям, так и ионным жидкостям, ввиду хорошей извлекающей способности, простоты получения, дешевизны и нетоксичности. Экстракцию целевых веществ из водорослей проводили методом мацерации при температурах от 50 до 110 °С, отношении массы сырья к массе растворителя 1 : 10 в течение 6 ч. В экстрактах определяли содержание хлорофилла, каротиноидов, полифенолов, полисахаридов и альгинатов. Предварительное сравнение экстрагирующей способности было проведено для ГЭР, образованных смешением хлорида холина с молочной кислотой (ChCl : LA) и с мочевиной (ChCl : U). Установлено, что растворяющая способность ChCl : LA более чем в два раза превосходит таковую для ChCl : U, при этом в экстракте обнаружено в три раза больше полифенолов. По величине выхода экстракта и содержанию полифенолов подобрано соотношение компонентов ГЭР ChCl : LA 1 : 2. Анализ состава экстрактов, полученных при обработке водорослей ГЭР ChCl : LA, показал, что наилучшим условием экстракции является температура 80 °С, в этом случае получаемые экстракты наиболее богаты биологически активными веществами.

*Ключевые слова:* бурые водоросли, глубокие эвтектические растворители, экстракция, экстракты, состав, биологически активные вещества.

---

**Для цитирования:** Скребец Т.Э., Маматмуродов Х.Б., Попов Н.В., Боголицын К.Г. Экстракция биологически активных веществ *Ascophyllum nodosum* глубокими эвтектическими растворителями // Химия растительного сырья. 2026. №2. С. 227–235. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260217681>.

---

### Введение

Морские водоросли представляют собой практически неиссякаемый источник ценных химических соединений, применяемых в сельском хозяйстве (включая корма для животных, стимуляторы здоровья и роста растений), фармацевтической, косметической промышленности, в качестве продуктов питания человека и нутрицевтиков. Биомасса морских водорослей содержит белки, липиды, углеводы, витамины, аминокислоты, полисахариды, пигменты и минералы и используется для приготовления широкого спектра пищевых продуктов. Биоперерабатывающие заводы, использующие морские водоросли в качестве сырья, привлекают интерес во всем мире и выпускают продукцию небольшого объема с высокой добавленной стоимостью.

Для извлечения биологически активных веществ (БАВ) используют различные виды экстракции с применением традиционных растворителей [1, 2]. Глубокие эвтектические растворители (ГЭР, deep eutectic solvents, DES) как новый тип растворителей, были получены в начале 2000-х и сразу составили конкуренцию классическим растворителям (этанолу, ацетону, гептану и другим органическим соединениям) и ионным жидкостям (ИЖ) ввиду, в первую очередь, простоты получения, дешевизны используемых для этого компонентов, отсутствия необходимости очистки, возможности изменения физико-химических свойств за счет

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

подбора компонентов и соразвителей, а также нетоксичности, нелетучести, биоразлагаемости. При этом на эффективность экстракции в значительной степени влияют природа компонентов ГЭР (акцептора и донора водородной связи), их вязкость, а также присутствие воды, которая влияет как на реологические, так и на полярные свойства ГЭР [3, 4]. Таким образом, использование ГЭР в каждом конкретном случае требует подбора компонентов, обеспечивающих требуемые свойства растворителя, количества добавляемой воды, а также температуры экстракции.

В настоящее время известно достаточно много работ, посвященных использованию ГЭР в качестве экстрагентов для извлечения полезных компонентов из растительного сырья различного происхождения [3, 5–13]. В основном исследования направлены на получение биологически активных веществ из лекарственных растений. Применение ГЭР для экстракции БАВ из водорослей в настоящее время в основном направлено на извлечение полифенолов [14–16]. В работе Облучинской с соавторами для извлечения липофильных (фукоксантин) и гидрофильных (аскорбиновая кислота и флоротаннин) соединений из бурой водоросли *Fucus vesiculosus* [16] впервые были использованы смеси холина хлорида с молочной кислотой в соотношении 1 : 3 и молочной кислоты с глюкозой в соотношении 5 : 1. Обработку проводили с использованием ультразвука, положительное влияние которого на процесс экстракции подтверждено в более ранних работах [16, 17].

ГЭР состава хлорид холина – молочная кислота в соотношении 1 : 2 при добавке 20% воды был успешно использован в сочетании с ультразвуковой обработкой для извлечения полифенолов, обладающих ингибирующей активностью в отношении ферментов, влияющих на артериальную гипертензию и сахарный диабет, из красной водоросли *Hypnea flagelliformis* [18]. Исследование показало, что данный ГЭР более эффективен, чем традиционные экстрагенты (вода, 80% этанол и 80% метанол). Оптимальные условия, позволившие извлечь максимально ( $87.98 \pm 1.22$ ) мг/100 г полифенолов, – мощность ультразвука от 20 до 40, продолжительность 20–30 мин, гидромодуль 20 : 1–40 : 1 мл/г.

В работе [19] приведены данные о получении экстрактов из некоторых видов водорослей с использованием ГЭР на основе хлорида холина с мочевиной, глицерином, этиленгликолем и пропандиолом. Из *Fucus vesiculosus* удалось извлечь 116.33% сахаров. Выход фукоидана из *Saccharina japonica* составил 14.93%, а альгината – 28.12%. Содержание полисахаридов в экстрактах из *Sargassum horneri* после обработки ГЭР составил 11.3%. Выход каррагинана из *Kappaphycus alvarezii* 53.64%. Все обработки проводили при температурах от 70 до 168 °С в присутствии воды. Необходимость высоких температур очевидна, поскольку поставленная цель извлечения углеводов требует условий, при которых проходит гидролиз полисахаридов, а гидромодуль в каждом случае следует подбирать экспериментально.

Таким образом, ГЭР на основе хлорида холина как акцептора водородной связи и различных доноров водородной связи показали свою перспективность как экстрагенты биологически активных веществ из растительного сырья.

Цель настоящего исследования – сравнение эффективности экстракции биологически активных компонентов из бурой водоросли *Ascophyllum nodosum* глубокими эвтектическими растворителями различного состава.

### **Объект и методы исследования**

В качестве объекта исследования в настоящей работе использован образец промыслового макрофита Белого моря аскофиллума узловатого (*Ascophyllum nodosum*), который был отобран в акватории Соловецкого архипелага в августе, в период заготовки бурых водорослей. Данный вид водоросли содержит наибольшее количество биологически активных компонентов, таких как полифенолы, пигменты и полисахариды, биосинтез которых активен в летний период (июль – август) [20, 21].

В качестве экстрагентов БАВ из биомассы водорослей выбраны ГЭР на основе наиболее широко применяемого акцептора водородной связи – хлорида холина (99%, LEAPChem, Китай). В качестве доноров водородной связи использовали вещества, способные образовывать с хлоридом холина эвтектические смеси с достаточно низкой температурой плавления (около комнатной) – мочевины (99.8%, Ленреактив, Россия) и молочная кислота (80%, Ленреактив, Россия).

Для приготовления ГЭР навески компонентов брали на аналитических весах с точностью до 0.0001 г, помещали в колбу и выдерживали в ультразвуковой ванне при температуре 60 °С и мощности ультразвука 40 Вт в течение 1.5 ч до получения прозрачной однородной жидкости. Полученный ГЭР перемешивали на

магнитной мешалке в течение 15 мин при 500 об./мин, после чего выдерживали в закрытом сосуде при комнатной температуре (18–24 °С) в течение 24 ч.

Обработки водорослей выполняли в кинетическом режиме с перемешиванием в термостате OptiMax 1001 (METTLER TOLEDO, США). Экстракты, полученные в результате 6 ч обработки при 110 °С, отношении массы сырья к массе растворителя 1 : 10, сравнивали по выходу экстрактивных веществ и содержанию полифенолов. Экстракцию ГЭР хлорид холина-молочная кислота (ChCl:LA) в соотношении 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3 (содержащими 8.9, 12.4, 14.2% воды соответственно) проводили при температурах 50, 80, 110 °С в тех же условиях. После экстракции смесь центрифугировали при 7000 об./мин в течение 5 мин и отделяли жидкий экстракт от твердого остатка. Остаток промывали водой, высушивали и рассчитывали выход по разности масс навески сырья и остатка после экстракции. Эксперимент выполняли в трех повторностях.

Аналізу подвергали полученные экстракты, разбавленные в 100 раз водой для разрушения структуры ГЭР. Концентрацию пигментов в экстракте анализировали спектрофотометрически согласно методу, описанному в работе [22]. Полифенолы в экстрактах бурых водорослей определяли спектрофотометрически согласно методу Wang и др. [23–24] с использованием реактива Folin-Ciocalteu (Sigma Aldrich, США). Концентрацию полифенолов в растворе рассчитывали согласно калибровочной кривой, построенной по стандартным растворам флороглюцина ( $\geq 99.0\%$ , Sigma Aldrich, США). Содержание легкогидролизуемых полисахаридов оценивали по количеству редуцирующих веществ, определенных спектрофотометрически по реакции с 3,5-динитросалициловой кислотой (98%, Acros Organics, Бельгия) согласно методу, описанному в работе [25]. Содержание альгинатов в экстракте определяли спектрофотометрическим методом по связыванию с красителем альциановым синим (ApliChem, Италия), описанному в работе [26].

### Результаты и обсуждение

Поскольку в литературных источниках приводится довольно большой разброс данных по содержанию БАВ в бурых водорослях, в том числе и в *Ascophyllum nodosum*, определение содержания БАВ в исследуемом образце аскофиллума узловатого выполнено по методикам [21, 22].

Химический состав образца представлен в таблице.

Первоначально проведено сравнение эффективности экстракции *Ascophyllum nodosum* ГЭР различного состава (акцептор водородных связей – холин хлорид (ChCl), доноры водородных связей – мочевины (U) и молочная кислота (LA)), мольное соотношение 1 : 2 при температуре 110 °С в течение 6 ч при отношении массы сырья к массе растворителя 1 : 10. Выходы экстракта в % от массы сырья показаны на рисунке 1.

Как видно из диаграммы (рис. 1), ГЭР состава ChCl : LA (1 : 2) обладает более высокой экстракционной эффективностью по отношению к компонентам биомассы бурых водорослей по сравнению с ГЭР состава ChCl : U (1 : 2) (71 и 32% соответственно). Это можно объяснить тем, что в кислой среде углеводная составляющая биомассы подвергается процессу кислотного гидролиза, поскольку для приготовления ГЭР использовалась 80% молочная кислота (водный раствор). При этом происходит изменение капиллярно-пористой структуры биомассы водорослей и разрыв углеродных и водородных связей. Следовательно, увеличивается удельная поверхность, что способствует дальнейшему диффузионному процессу [27] (рН ГЭР состава ChCl : LA (1 : 2) равен 2, в то же время рН ГЭР состава ChCl : U (1 : 2) равен 7). Кроме того, наличие воды снижает вязкость ГЭР и облегчает проникновение растворителя в биомассу бурых водорослей [28].

Используемые в работе ГЭР существенно отличаются по способности к специфической сольватации. В этом случае сольватационные процессы будут определяться в основном полярностью и поляризуемостью растворителя, его способностью к специфическим, донорно-акцепторным взаимодействиям [29]. Определение сольватохромных параметров: энергии сольватации Димрота-Райхардта, параметров Камлета-Тафта (поляризуемости, основности, кислотности), применяемых для количественной оценки полярности и сольватирующей способности растворителей, для ГЭР ChCl : U и ChCl : LA показало [30], что эти растворители имеют примерно одинаковое значение энергии сольватации, которая характеризует общую сольватирующую способность растворителя, но при этом существенно отличаются по параметрам поляризуемости, кислотности и основности Камлета-Тафта ( $\pi^*$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ , соответственно). Параметр Камлета-Тафта  $\pi^*$  характеризует поляризуемость растворителя без влияния кислотности. Параметр  $\alpha$ , в свою очередь, характеризует кислотность растворителя, т.е. его способность выступать донором водородных связей, а  $\beta$  – основность (способность быть акцептором водородных связей). ChCl : LA обладает большими значениями  $\alpha$  и  $\beta$ , это

подтверждает тот факт, что процесс экстракции БАВ из водорослей в значительной степени объясняется донорно-акцепторными взаимодействиями в системе, а не обуславливается неспецифической сольватацией (параметр поляризуемости  $\pi^*$  выше у  $\text{ChCl} : \text{U}$ , чем у  $\text{ChCl} : \text{LA}$ ).

В полученных экстрактах методом с использованием реактива Фолина-Чокалтеу определено содержание полифенолов (рис. 2).

Как следует из диаграммы, содержание полифенолов в экстрактах ГЭР состава  $\text{ChCl} : \text{LA}$  (1 : 2) в 2.9 раза превосходит их содержание в ГЭР состава  $\text{ChCl} : \text{U}$  (1 : 2). В соответствии с экспериментальными результатами, приведенными в литературе [15], ГЭР на основе холина хлорида и молочной кислоты сочетает в себе кислотные свойства, способствующие экстракции полифенолов, а также более низкую вязкость.

Таким образом, ГЭР состава  $\text{ChCl} : \text{LA}$  является более эффективным экстрагентом биологически активных веществ, в частности, полифенолов из бурых водорослей.

Для определения оптимального состава ГЭР  $\text{ChCl} : \text{LA}$  исследовано влияние мольного соотношения его компонентов на экстракцию биомассы бурых водорослей (*Ascophyllum nodosum*). Состав ГЭР  $\text{ChCl} : \text{LA}$  варьировали в мольном соотношения 1 : 1, 1 : 2 и 1 : 3. Результаты эксперимента представлены на рисунках 3 и 4.

Показано, что мольное соотношение компонентов в исследованном интервале не оказывает значительного влияния на растворяющую способность ГЭР (рис. 3), однако влияет на степень извлечения полифенолов (рис. 4): ГЭР состава  $\text{ChCl} : \text{LA}$  (1 : 2) извлекает их более эффективно по сравнению с ГЭР с другими мольными соотношениями. В соответствии с предполагаемыми механизмами образования структуры ГЭР [7, 19] это можно объяснить тем, что полифенолы, обладая слабыми кислотными свойствами за счет свободных фенольных гидроксильных групп, являются донорами протонов и конкурируют за место образования водородных связей в структуре ГЭР, а при соотношении компонентов глубокого эвтектического растворителя 1 : 2 образуется устойчивая структура ГЭР вследствие оптимального соотношения донорных и акцепторных групп.

Таким образом, установлено, что ГЭР хлорид холина-молочная кислота в молярном соотношении 1 : 2 является эффективным экстрагентом для извлечения БАВ из биомассы бурых водорослей: выход растворимых веществ и содержание полифенолов составляет 71 и 7.52% масс. от исходного сырья соответственно.

#### Химический состав аскофиллума узловатого, масс. %

Хлорофилл	Каротиноиды	Полифенолы	Альгинаты	Полисахариды
0.07±0.002	0.02±0.002	11.95±0.5	22.66±0.8	22.68±0.6

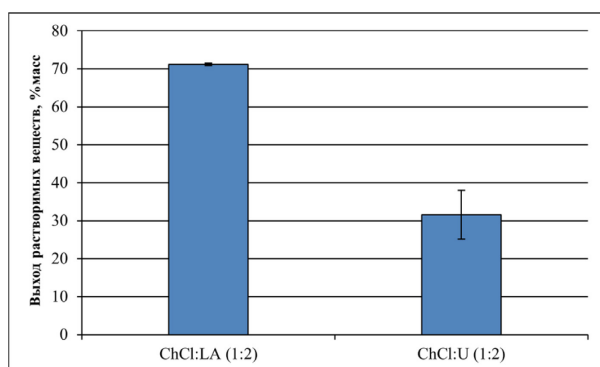


Рис. 1. Растворяющая способность ГЭР разного состава

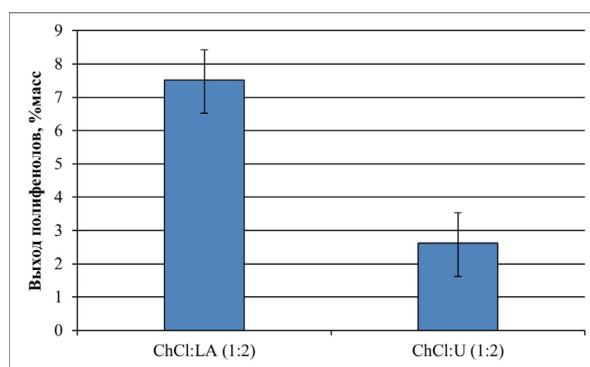


Рис. 2. Содержание полифенолов в экстрактах

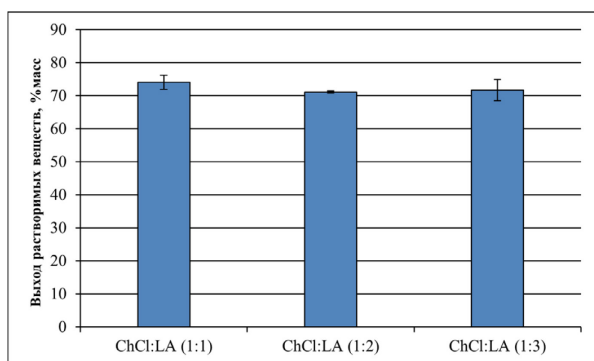


Рис. 3. Растворяющая способность ГЭР в зависимости от мольного соотношения донор – акцептор

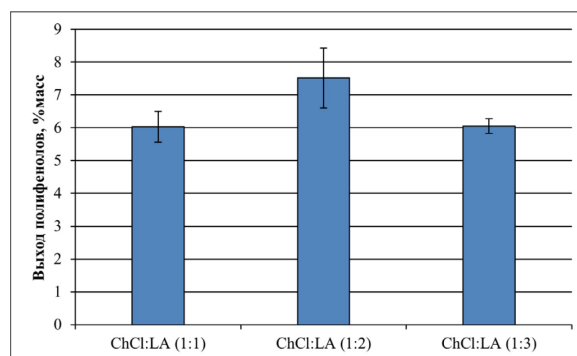


Рис. 4. Содержание полифенолов в растворах ГЭР в зависимости от мольного соотношения компонентов

Для более полной характеристики процесса экстракции БАВ из водорослевого сырья ГЭР ChCl : LA (1 : 2) с целью получения насыщенного ими продукта проанализировали состав экстрактов, полученных в расширенном диапазоне температур (50, 80 и 110 °С), на содержание в них пигментов, полисахаридов, полифенолов. Известно, что БАВ, в частности, пигменты неустойчивы при воздействии температур выше 70–80 °С, поэтому снижение температуры обработки может положительно сказаться на количестве извлекаемых компонентов в составе экстрактов. Оценка содержания хлорофилла в экстрактах показала, что если при экстракции при 50 °С удастся извлечь до 97.5% от общего содержания его в субстрате, то при 80 и 110 °С хлорофиллы в экстракте обнаружены в незначительных количествах (11.3 и 6.3%отн.), соответственно (рис. 5). При извлечении остальных биологически активных компонентов повышение температуры оказывает положительное влияние на степень извлечения (рис. 6). Однако извлечение полисахаридов, определяемых как легкогидролизуемые, происходит полностью уже при температуре 50 °С. Определение содержания их в экстрактах, полученных при температуре 80 и 100 °С, выше 100%отн. можно объяснить разрушением полисахаридов при высоких температурах и увеличением при этом количества редуцирующих групп.

Следовательно, уже при температуре обработки 50 °С можно получить экстракты, богатые различными БАВ, повышение температуры приведет к обеднению их хлорофиллами, но обогащению другими биологически активными компонентами.

Если оценивать суммарно экстракцию ГЭР ChCl : LA (1 : 2) хлорофиллов, каротиноидов, полифенолов, легкогидролизуемых полисахаридов и альгинатов, то при 50 °С можно извлечь 35.8% от их общего содержания в *Ascophyllum nodosum*, при 80 °С – 51.6%, при 110 °С – 57.3%.

Таким образом, для получения экстрактов из *Ascophyllum nodosum*, богатых биологически активными веществами, рекомендуется при использовании ГЭР ChCl : LA (1 : 2) проводить извлечение при температуре 80 °С.

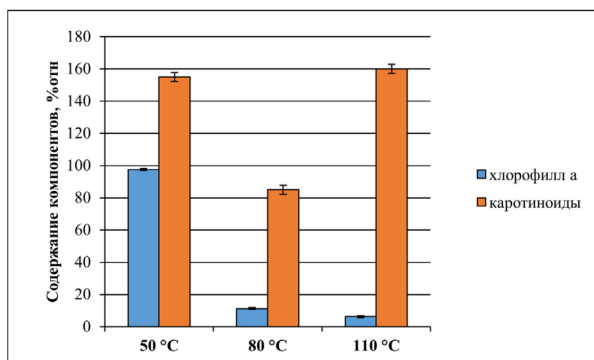


Рис. 5. Содержание пигментов в экстрактах, %отн.

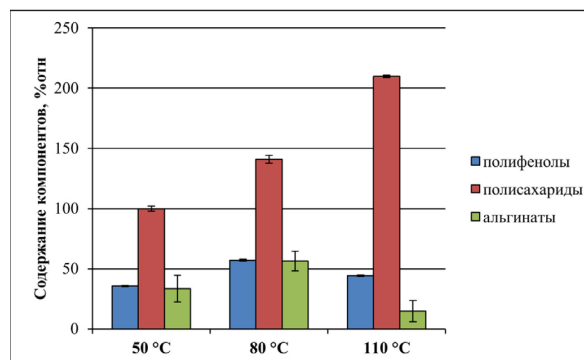


Рис. 6. Содержание полифенолов, альгинатов и полисахаридов в экстрактах, %отн.

Сравнение состава БАВ экстрактов, полученных из *Ascophyllum nodosum* с помощью ГЭР  $\text{CHCl}_3 : \text{LA}$  (1 : 2) с экстрактами на основе *изопропанола* с добавкой 40% воды из этого же вида водоросли [31, 32] показало, что выход экстрагируемых веществ в первом случае достигает 70%, в то время как система вода-*изопропанол* извлекает только 23–25%. При температуре обработки 50 °С практически на 100% извлекаются хлорофиллы и легкогидролизуемые полисахариды. Для экстрактов, полученных при использовании системы *изопропанол* – вода в качестве растворителя при 60 °С, эти показатели достигают 11–12%отн. и 25–26%отн. соответственно. Существенно выше при обработке ГЭР содержание альгинатов (40%отн. против 7–8% отн.). Выход полифенолов примерно одинаков – 45–50%отн.

### Выводы

1. Сравнение экстрагирующей способности ГЭР на основе хлорида холина показало, что она в значительной степени зависит от донора водородной связи: кислотный характер донора способствует гидролизу и переходу компонентов в фазу экстракта, а также обеспечивает более высокие значения сольватохромных параметров Тафта – кислотности и основности.

2. Глубокий эвтектический растворитель состава хлорид холина – молочная кислота в соотношении 1 : 2 позволяет получать экстракты, насыщенные биологически активными веществами (пигментами, полифенолами, полисахаридами) из бурых водорослей промышленного вида *Ascophyllum nodosum*.

3. Определены наилучшие параметры процесса экстракции бурой водоросли *Ascophyllum nodosum* ГЭР хлорид холина – молочная кислота методом мацерации: температура 80 °С, отношении массы сырья к массе растворителя 1 : 10.

4. Полученные результаты показывают необходимость изучения экстракции БАВ водорослей глубокими эвтектическими растворителями, содержащими доноры водородной связи кислотного характера, а именно, одно- и двухосновные карбоновые кислоты.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №25-26-20031.

### Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

### Список литературы

1. Løvstad Holdt S., Kraan S. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation // J. Appl. Phycol. 2011. Vol. 23. Pp. 543–597. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>.
2. Natural Products From Marine Algae. Methods and Protocols / ed. D.B. Stengel, S. Connan. New York, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2684-8>.
3. Морозова О.В., Васильева И.С., Шумакович Г.П., Зайцева Е.А., Ярополов А.И. Глубокие эвтектические растворители в биотехнологии // Успехи биологической химии. 2023. Т. 63. С. 301–348.
4. Tolmachev D., Lukasheva N., Ramazanov R. et al. Computer simulations of deep eutectic solvents: challenges, solutions, and perspectives // International Journal of Molecular Sciences. 2022. Vol. 23. 645.
5. Vilková M., Plotka-Wasyłka J., Andruch V. The role of water in deep eutectic solvent-base extraction // Journal of Molecular Liquids. 2020. Vol. 304. 112747. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112747>.
6. Zainal-Abidin M.H., Hayyan M., Hayyan A., Jayakumar N.S. New horizons in the extraction of bioactive compounds using deep eutectic solvents: A review // Analytica Chimica Acta. 2017. Vol. 979. Pp. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.05.012>.
7. Kalthor P., Ghandi K. Deep eutectic solvents for pretreatment, extraction, and catalysis of biomass and food waste // Molecules. 2019. Vol. 24. 4012. <https://doi.org/10.3390/molecules24224012>.
8. Fuad F.M., Nadzir M.M., Harun A. Hydrophilic natural deep eutectic solvent: A review on physicochemical properties and extractability of bioactive compounds // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 339. 116923. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116923>.
9. Alam M.A., Muhammad G., Khan M.N., Mofijur M., Lv Y., Xiong W., Xu J. Choline chloride based deep eutectic solvents as green extractants for the isolation of phenolic compounds from biomass // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 309. 127445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127445>.

10. Socas-Rodríguez B., Torres-Cornejo M.V., Álvarez-Rivera G., Mendiola J.A. Deep eutectic solvents for the extraction of bioactive compounds from natural sources and agricultural by-products // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. 4897. <https://doi.org/10.3390/app11114897>.
11. Redha A. Review on extraction of phenolic compounds from natural sources using green deep eutectic solvents // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2021. Vol. 69. Pp. 878–912.
12. Ling J.K.U., Hadinoto K. Deep eutectic solvent as green solvent in extraction of biological macromolecules: A Review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23. 3381. <https://doi.org/10.3390/ijms23063381>.
13. Moldes D., Rojo E.M., Bolado S., García-Encina P.A., Comesaña-Gándara B. Biodegradable solvents: A promising tool to recover proteins from microalgae // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. 2391. <https://doi.org/10.3390/app12052391>.
14. Облучинская Е.Д., Даурцева А.В., Пожарицкая О.Н., Флисюк Е.В., Шиков А.Н. Природные глубокие эвтектические растворители как альтернативные экстрагенты для извлечения флоротанинов бурых водорослей // *Химико-фармацевтический журнал*. 2019. Т. 53, №3. С. 45–49. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2019-53-3-45-49>.
15. Obluchinskaya E.D., Pozharitskaya O.N., Shevyrin V.A., Kovaleva E.G., Flisyuk E.V., Shikov A.N. Optimization of Extraction of Phlorotannins from the Arctic *Fucus vesiculosus* using Natural Deep Eutectic Solvents and their HPLC Profiling with Tandem High Resolution Mass Spectrometry // *Mar. Drugs*. 2023. Vol. 21. 263. <https://doi.org/10.3390/md21050263>.
16. Obluchinskaya E.D., Pozharitskaya O.N., Zakharova L.V., Daurtseva A.V., Flisyuk E.V., Shikov A.N. Efficacy of Natural Deep Eutectic Solvents for Extraction of Hydrophilic and Lipophilic Compounds from *Fucus vesiculosus* // *Molecules*. 2021. Vol. 26. 4198. <https://doi.org/10.3390/molecules26144198>.
17. Obluchinskaya E.D., Daurtseva A.V., Pozharitskaya O.N., Flisyuk E.V., Shikov A.N. Natural Deep Eutectic Solvents as alternatives for extracting phlorotannins from brown algae // *Pharm. Chem. J*. 2019. Vol. 53. Pp. 243–247.
18. Olfat A., Mostaghim T., Shahriari S., Salehifar M. Extraction of bioactive compounds of *Hypnea flagelliformis* by ultrasound-assisted extraction coupled with natural deep eutectic solvent and enzyme inhibitory activity // *Algal Research*. 2024. Vol. 78. 103388. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103388>.
19. Liu Y., Gao L., Chen L., Zhou W., Wang C., Ma L. Exploring carbohydrate extraction from biomass using deep eutectic solvents: Factors and mechanisms // *iScience*. 2023. Vol. 26. 107671. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107671>.
20. Bogolitsyn K. et al. Seasonal variations in the chemical composition of Arctic brown macroalgae // *Algal Research*. 2023. Vol. 72. 103112. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103112>.
21. Боголицын К.Г., Паршина А.Э., Дружинина А.С., Шульгина Е.В. Сравнительная характеристика химического состава некоторых представителей бурых водорослей Белого и Желтого морей // *Химия растительного сырья*. 2020. №3. С. 35–46. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2020037417>.
22. ГОСТ 26185-84. Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа. М., 2010. 188 с.
23. Ismail G.A. Biochemical composition of some Egyptian seaweeds with potent nutritive and antioxidant properties // *Journal of Food Science and Technology*. 2017. Vol. 37, no. 2. Pp. 294–302.
24. Wang T. et al. Antioxidant capacities of phlorotannins extracted from the brown algae *Fucus vesiculosus* // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012. Vol. 60, no. 23. Pp. 5874–5883.
25. Garriga M., Almaraz M., Marchiaro A. Determination of reducing sugars in extracts of *Undaria pinnatifida* (Harvey) algae by UV-visible spectrophotometry (DNS method) // *Actas de Ingeniería*. 2017. Vol. 3. Pp. 173–179.
26. Schiener P. et al. The seasonal variation in the chemical composition of the kelp species *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea*, *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta* // *Journal of Applied Phycology*. 2015. Vol. 27, no. 1. Pp. 363–373.
27. Chen Z., Ragauskas A., Wan C. Lignin extraction and upgrading using deep eutectic solvents // *Industrial crops and products*. 2020. Vol. 147. 112241. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112241>.
28. Dardavila M.M. et al. Extraction of bioactive compounds from *C. vulgaris* biomass using deep eutectic solvents // *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 1. 415. <https://doi.org/10.3390/molecules28010415>.
29. Marcus Y. The properties of solvents. Hebrew University Department of Chemistry – Wiley, 1998. 239 p.
30. Bogolitsyn K.G., Popov N.V., Skrebets T.E., Mamatmurodov H.B., Ladesov A.V. Solvatochromic Parameters of Deep Eutectic Solvents Based on Choline Chloride and Carboxylic Acids // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2025. Vol. 99, no. 11. Pp. 2646–2654. <https://doi.org/10.1134/S0036024425702140>.
31. Паршина А.Э., Маматмуродов Х.Б., Боголицын К.Г., Поломарчук Д.А., Попов Н.В. Сравнение экстракционной эффективности органических растворителей и бинарных систем для получения биологически активных комплексов Арктических бурых водорослей // *Химия растительного сырья*. 2023. №4. С. 165–178. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.20230412553>.
32. Патент №2803597 (РФ). Способ получения экстрактов арктических бурых водорослей, обладающих фитохимическими свойствами / К.Г. Боголицын, А.Э. Паршина, А.В. Одинцова, М.П. Семушина, Т.Э. Скребец, Х.Б. Маматмуродов. – 18.09.2023.

*Поступила в редакцию 21 июля 2025 г.*

*После переработки 22 октября 2025 г.*

*Принята к публикации 27 ноября 2025 г.*

*Skrebets T.E.\**, *Mamatmurodov Kh.B.*, *Popov N.V.*, *Bogolitsyn K.G.* EXTRACTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES OF ASCOPHYLLUM NODOSUM WITH DEEP EUTECTIC SOLVENTS

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, emb. Severnaya Dvina, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia, tskrebets@mail.ru*

Brown algae, particularly *Ascophyllum nodosum*, contain a large number of beneficial substances of varying polarity, for which extraction is one of the primary methods. In this study, biologically active substances (BAS) were extracted from *Ascophyllum nodosum* using deep eutectic solvents based on choline chloride to isolate a complex of biologically active compounds. Deep eutectic solvents (DES), which are a combination of a hydrogen bond donor and acceptor with a lower melting point than the individual components, have recently become significant competitors to both classical solvents and ionic liquids as extractants due to their good extraction capacity, ease of preparation, low cost, and non-toxicity. Extraction of target substances from algae was performed by maceration at temperatures ranging from 50 to 110 °C, with a raw material to solvent ratio of 1 : 10 for 6 h. The extracts were analyzed for chlorophyll, carotenoids, polyphenols, polysaccharides, and alginates. A preliminary comparison of the extraction capacity was conducted for GERs formed by mixing choline chloride with lactic acid (ChCl : LA) and urea (ChCl : U). The solubility of ChCl : LA was found to be more than twice that of ChCl : U, while the extract contained three times more polyphenols. Based on extract yield and polyphenol content, a GER ChCl : LA ratio of 1 : 2 was selected. Analysis of the composition of extracts obtained by treating algae with GER ChCl : LA showed that the best extraction temperature is 80 °C; at this temperature, the resulting extracts are richest in biologically active substances.

**Keywords:** brown algae, deep eutectic solvents, extraction, extracts, composition, biologically active substances.

**For citing:** Skrebets T.E., Mamatmurodov Kh.B., Popov N.V., Bogolitsyn K.G. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 2, pp. 227–235. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260217681>.

## References

- Løvstad Holdt S., Kraan S. *J. Appl. Phycol.*, 2011, vol. 23, pp. 543–597. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>.
- Natural Products From Marine Algae. Methods and Protocols*, ed. D.B. Stengel, S. Connan. New York, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2684-8>.
- Morozova O.V., Vasil'yeva I.S., Shumakovich G.P., Zaytseva Ye.A., Yaropolov A.I. *Uspekhi biologicheskoy khimii*, 2023, vol. 63, pp. 301–348. (in Russ.).
- Tolmachev D., Lukasheva N., Ramazanov R. et al. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, vol. 23, 645.
- Vilková M., Płotka-Wasyłka J., Andruch V. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, vol. 304, 112747. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112747>.
- Zainal-Abidin M.H., Hayyan M., Hayyan A., Jayakumar N.S. *Analytica Chimica Acta*, 2017, vol. 979, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.05.012>.
- Kalhor P., Ghandi K. *Molecules*, 2019, vol. 24, 4012. <https://doi.org/10.3390/molecules24224012>.
- Fuad F.M., Nadzir M.M., Harun A. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, vol. 339, 116923. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116923>.
- Alam M.A., Muhammad G., Khan M.N., Mofijur M., Lv Y., Xiong W., Xu J. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 309, 127445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127445>.
- Socas-Rodríguez B., Torres-Cornejo M.V., Álvarez-Rivera G., Mendiola J.A. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, 4897. <https://doi.org/10.3390/app11114897>.
- Redha A. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, vol. 69, pp. 878–912.
- Ling J.K.U., Hadinoto K. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, vol. 23, 3381. <https://doi.org/10.3390/ijms23063381>.
- Moldes D., Rojo E.M., Bolado S., García-Encina P.A., Comesaña-Gándara B. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, 2391. <https://doi.org/10.3390/app12052391>.
- Obluchinskaya Ye.D., Daurtseva A.V., Pozharitskaya O.N., Flisyuk Ye.V., Shikov A.N. *Khimiko-farmatsevticheskii zhurnal*, 2019, vol. 53, no. 3, pp. 45–49. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2019-53-3-45-49>. (in Russ.).
- Obluchinskaya E.D., Pozharitskaya O.N., Shevyrin V.A., Kovaleva E.G., Flisyuk E.V., Shikov A.N. *Mar. Drugs*, 2023, vol. 21, 263. <https://doi.org/10.3390/md21050263>.
- Obluchinskaya E.D., Pozharitskaya O.N., Zakharova L.V., Daurtseva A.V., Flisyuk E.V., Shikov A.N. *Molecules*, 2021, vol. 26, 4198. <https://doi.org/10.3390/molecules26144198>.
- Obluchinskaya E.D., Daurtseva A.V., Pozharitskaya O.N., Flisyuk E.V., Shikov A.N. *Pharm. Chem. J.*, 2019, vol. 53, pp. 243–247.
- Olfat A., Mostaghim T., Shahriari S., Salehifar M. *Algal Research*, 2024, vol. 78, 103388. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103388>.
- Liu Y., Gao L., Chen L., Zhou W., Wang C., Ma L. *iScience*, 2023, vol. 26, 107671. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107671>.
- Bogolitsyn K. et al. *Algal Research*, 2023, vol. 72, 103112. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103112>.
- Bogolitsyn K.G., Parshina A.E., Druzhinina A.S., Shul'gina Ye.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 3, pp. 35–46. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020037417>. (in Russ.).
- GOST 26185-84. Vodorosli morskoye, travy morskoye i produkty ikh pererabotki. Metody analiza*. [GOST 26185-84. Seaweeds, seagrasses and their processed products. Methods of analysis]. Moscow, 2010, 188 p. (in Russ.).

\* Corresponding author.

23. Ismail G.A. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 294–302.
24. Wang T. et al. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, vol. 60, no. 23, pp. 5874–5883.
25. Garriga M., Almaraz M., Marchiaro A. *Actas de Ingeniería*, 2017, vol. 3, pp. 173–179.
26. Schiener P. et al. *Journal of Applied Phycology*, 2015, vol. 27, no. 1, pp. 363–373.
27. Chen Z., Ragauskas A., Wan C. *Industrial crops and products*, 2020, vol. 147, 112241. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112241>.
28. Dardavila M.M. et al. *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 1, 415. <https://doi.org/10.3390/molecules28010415>.
29. Marcus Y. *The properties of solvents*. Hebrew University Department of Chemistry – Wiley, 1998, 239 p.
30. Bogolitsyn K.G., Popov N.V., Skrebets T.E., Mamatmurodov H.B., Ladesov A.V. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2025, vol. 99, no. 11, pp. 2646–2654. <https://doi.org/10.1134/S0036024425702140>.
31. Parshina A.E., Mamatmurodov Kh.B., Bogolitsyn K.G., Polomarchuk D.A., Popov N.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2023, no. 4, pp. 165–178. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412553>. (in Russ.).
32. Patent 2803597 (RU). 18.09.2023. (in Russ.).

Received July 21, 2025

Revised October 22, 2025

Accepted November 27, 2025

#### Сведения об авторах

*Скребец Татьяна Эдуардовна* – кандидат химических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии, [t.skrebets@narfu.ru](mailto:t.skrebets@narfu.ru), [tskrebets@mail.ru](mailto:tskrebets@mail.ru)

*Маматмуродов Хуршед Бекмахмадович* – кандидат химических наук, заведующий лабораторией кафедры теоретической и прикладной химии, [khurshedjon906@gmail.com](mailto:khurshedjon906@gmail.com)

*Попов Николай Владимирович* – аспирант кафедры теоретической и прикладной химии, [t.skrebets@narfu.ru](mailto:t.skrebets@narfu.ru)

*Боголицын Константин Григорьевич* – доктор химических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, [k.bogolitsin@narfu.ru](mailto:k.bogolitsin@narfu.ru)

#### Information about authors

*Skrebets Tatyana Eduardovna* – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, [t.skrebets@narfu.ru](mailto:t.skrebets@narfu.ru), [tskrebets@mail.ru](mailto:tskrebets@mail.ru)

*Mamatmurodov Khurshed Bekmahmadovich* – Candidate of Chemical Sciences, Head of the Laboratory of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, [khurshedjon906@gmail.com](mailto:khurshedjon906@gmail.com)

*Popov Nikolay Vladimirovich* – Postgraduate student of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, [t.skrebets@narfu.ru](mailto:t.skrebets@narfu.ru)

*Bogolitsyn Konstantin Grigorievich* – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, [k.bogolitsin@narfu.ru](mailto:k.bogolitsin@narfu.ru)