

Научная статья

УДК 663.18

DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-66-79

Подбор рациональных параметров экстракции полисахаридов водорослей с использованием ферментативного гидролиза

Елена Викторовна Ульрих

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

elen.ulrich@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

Аннотация. В последние годы растет интерес к разработке новых полимерных, нетоксичных, биоразлагаемых, извлекаемых из возобновляемых ресурсов материалов, таких как целлюлоза. Целью данной работы являлся подбор рациональных параметров экстракции полисахаридов водорослей (в том числе целлюлозы) с использованием ферментативного гидролиза. Экстракцию полисахаридов из биомассы водорослей проводили с использованием разбавленных минеральных кислот, щелочи и воды. Для гидролиза талломы водорослей разделяли на части, измельчали на куски разных размеров (5–10 см) и высушивание в течение 15 ч в печи при 105–106 °С для облегчения тонкого помола. Высушенную биомассу измельчали до частиц размерами 0,1; 1,0; 5,0 и 10,0 см. Эффективной явилась твердая загрузка с массовой долей 10 %. При проведении гидролиза использовался ферментный препарат «Целлюлаза ультра» для расщепления ксиланов и других некрахмальных полисахаридов. Для определения сахаров применяли спектрофотометрический метод, основанный на взаимодействии сахаров с антроновым реактивом. Содержание полисахаридов в экстрактах, выделенных при 100 °С, варьировало от 0,77±0,09 г для красных водорослей до 1,31±0,14 г для бурых водорослей в зависимости от продолжительности экстракции. Установлено, что рациональными параметрами проведения ферментативной экстракции целлюлозы являются степень измельчения образца 0,1–0,5 см, температурный диапазон 180–200 °С, давление 1,0–1,5 Мпа. Подобранные условия позволяют выделить волокна от светло-бежевого до коричневатого цвета без обугливания. Полученные данные о ферментативном гидролизе водорослей с целью разложения целлюлозы свидетельствуют о том, что эффективность этого процесса и состав изготовленных продуктов в существенной степени зависят от особенностей структуры сырья, сбалансированности и активности целлюлазного комплекса ферментов, а также от применяемых методов гидролиза.

Ключевые слова: полисахариды, экстракция, ферментативный гидролиз, целлюлоза, водоросли.

Финансирование: Работа выполнена в соответствии с утвержденным планом тематик научных исследований ФГБОУ ВО «КГТУ», осуществляемых за счет средств федерального бюджета (бюджетный цикл 2025-2027, регистрационный номер карты ЕГИСУ НИОКТР 1124072300009-1 от 23.07.2024 г.), соглашением о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ).

Для цитирования: Ульрих Е. В. Подбор рациональных параметров экстракции полисахаридов водорослей с использованием ферментативного гидролиза // Известия КГТУ. 2026. № 82. С. 66–79. DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-66-79.

Original article

Selection of rational parameters for the extraction of algae polysaccharides using enzymatic hydrolysis

Elena V. Ul'rikh

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
elen.ulrich@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

Abstract. In recent years, there has been a growing interest in the development of new polymeric, non-toxic, biodegradable materials extracted from renewable resources, such as cellulose. The aim of this work is selection of rational parameters for the extraction of algal polysaccharides (including cellulose) using enzymatic hydrolysis. Extraction of polysaccharides from algal biomass has been carried out using dilute mineral acids, alkali and water. For hydrolysis, algae thalli have been divided into parts and crushed into pieces of different sizes (5–10 cm) and dried for 15 hours in an oven at 105–106 °C to facilitate fine grinding. The dried biomass has been crushed to particle sizes of 0.1; 1.0; 5.0 and 10.0 cm. A solid load with a mass fraction of 10% is effective. The hydrolysis has been performed using the enzyme «Cellulase Ultra», which is an enzymatic preparation for the breakdown of xylans and other non-starch polysaccharides. A spectrophotometric method based on the interaction of sugars with an anthrone reagent has been used to determine sugars. The polysaccharide content in extracts isolated at 100 °C ranged from 0.77±0.09 g for red algae to 1.31±0.14 g for brown algae, depending on the extraction duration. It has been established that the following rational parameters for the enzymatic extraction of cellulose are: a sample fineness of 0.1–0.5 cm, a temperature range of 180–200 °C, and a pressure of 1.0–1.5 MPa. The selected conditions allow for the extraction of fibers ranging from light beige to brownish in color without charring. The data obtained on the enzymatic hydrolysis of algae for the decomposition of cellulose indicate that the efficiency of this process and the composition of the resulting products depend significantly on the structural properties of the raw material, the balance and activity of the cellulase enzyme complex, and the hydrolysis methods used.

Keywords: polysaccharides, extraction, enzymatic hydrolysis, cellulose, algae.

Funding: The work was carried out in accordance with the approved plan of research topics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «KSTU», carried out at the expense of the federal budget (budget cycle 2025–2027, registration number of the EGISU R&D card 1124072300009-1 dated 07/23/2024), an

agreement on the provision of a subsidy from the federal budget for financial support for the implementation of a state assignment for the provision of public services (performance of work).

For citation: Ulrikh E. V. Selection of rational parameters for the extraction of algae polysaccharides using enzymatic hydrolysis. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(82):66–79. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-82-66-79.

ВВЕДЕНИЕ

В прибрежных районах Балтийского моря, где сосредоточена деятельность человека, присутствует большое количество питательных веществ и повышена температура воды, проблема увеличения выброса парниковых газов от гниения избыточной водной растительности становится еще более актуальной [1, 2]. Таким образом, очевидной является актуальность поиска решений по снижению климатической и экологической нагрузки, создаваемой избыточной водной растительностью.

В последние годы растет интерес к разработке новых полимерных, нетоксичных, биоразлагаемых, извлекаемых из возобновляемых ресурсов материалов, таких как целлюлоза [3, 4].

Содержание целлюлозы в водорослях и водных растениях варьирует, у бурых водорослей оно составляет 2–20 %, однако структура целлюлозы может отличаться от целлюлозы высших растений. У высших водных растений, как и у других растений, целлюлоза входит в состав клеточных стенок, придавая им жесткость и структуру [5]. Целлюлоза является основным компонентом клеточной стенки у некоторых водорослей, ее содержание составляет от 2 до 20 %. Структура целлюлозы у водорослей может отличаться от таковой у высших растений [6]. Например, у бурых водорослей ее иногда называют «альгулезой». У некоторых видов целлюлоза при гидролизе дает только глюкозу, в иных случаях состав полимера может включать и другие сахара. Так, у *Rhodymenia palmata* целлюлоза на 50 % состоит из ксилозы. Содержание целлюлозы в высших растениях, как правило, выше, чем у водорослей. Точное содержание целлюлозы варьирует в зависимости от вида растения, его части и возраста. Например, у древесных растений оно составляет 40–50 % от сухого веса. Целлюлоза представляет собой волокнистый полимер, содержащий звенья β -1,4-связанной глюкопиранозы, которые образуют естественную линейную структуру [7]. Биополимеры целлюлозы существуют в пяти различных полиморфах.

На основании литературных данных было установлено, что полисахариды содержатся в биомассе водных растений преимущественно в форме целлюлозы (до 70 %) [8]. Это позволяет сделать вывод о том, что поиск направлений использования целлюлозы в нативном виде или в форме продуктов ее переработки является очень необходимым [9]. Переработка избыточной биомассы водной растительности в ценные продукты позволит получить продукты с добавленной стоимостью при одновременном решении климатических и экологических задач [10].

Целью данной работы является подбор рациональных параметров экстракции полисахаридов водорослей (в том числе целлюлозы) с использованием ферментативного гидролиза.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Биомассу водорослей *Furcellaria*, *Cladophora*, *Ceramium*, *Ulva* и *Fucus* отбирали на побережье Балтийского моря в районе Филинской бухты (54°50'15" с. ш. 20°02'30" в. д.). Пробы производились с 15 мая по 30 августа 2025 г. в период волновой активности, когда на берегу скапливается максимальное количество водорослей.

Образцы доставляли в лабораторию в пластиковых тазах, где из биомассы удаляли крупные посторонние примеси (щепки, листья, фрагменты животных), затем биомассу промывали водопроводной водой для удаления песка и оставшихся мелких примесей. Чистую биомассу сушили на воздухе, потом досушивали при 40 °С в сушильном шкафу с конвекцией. Высушенные водоросли хранились в бумажных пакетах в сухом и хорошо проветриваемом помещении. Непосредственно перед анализом водоросли измельчали ножевым лабораторным измельчителем.

Первоначально проводилась экстракция полисахаридов из биомассы водорослей с использованием разбавленных минеральных кислот, щелочи и воды. В ходе эксперимента было обнаружено, что такие растворители, как 1М растворы серной и соляной кислот, дистиллированная вода, не позволяют выделить полисахариды. В свою очередь, щелочная экстракция 2 %-м раствором гидроксида калия позволила получить значительные выходы полисахаридов. В связи с этим было принято решение использовать данный реагент для проведения многофакторного эксперимента по подбору рациональных параметров экстракции полисахаридов. На основе анализа литературных данных были выбраны соотношения навески к растворителю 1:20 и 1:30. Использование большего объема растворителя не приводит к увеличению выхода продукта, и с точки зрения экологичности процесса было принято решение остановиться на соотношении 1:20.

После выделения полисахаридов провели гидролиз целлюлозы водных растений (в том числе ферментативный). Для этого талломы водорослей разделяли на части, измельчали до размеров 5–10 см и высушивали в течение 15 ч в печи при 105–106 °С для облегчения тонкого помола. Измельчали высушенную биомассу до частиц размерами 0,1; 1,0; 5,0 и 10,0 см. Эффективной была твердая загрузка с массовой долей 10 %, однако известны исследования с 12, 15 и 20 % [11]. При гидролизе использовали ферментный препарат «Целлюлаза ультра» для расщепления ксиланов и других некрахмальных полисахаридов. Действие препарата – гидролиз β -1,4-гликозидных связей в целлюлозе, эффективное расщепление некрахмальных полисахаридов, перевод их из нерастворимой формы в растворимую. Биохимические параметры препарата представлены в табл. 1.

Таблица 1. Биохимические параметры препарата «Целлюлаза ультра»
Table 1. Biochemical parameters of the preparation called «Cellulase Ultra»

Показатель	Значение
Активность, ед/г	2500
Температура	оптимум 50,0–60,0 °С; рабочий диапазон 30,0–65,0 °С
pH	оптимум 4,0–5,0; рабочий диапазон 2,0–7,0
Время	6 ч

Ферментная активность целлюлазы выражается в международных единицах U (или Ед) и равна количеству фермента, которое катализирует превращение 1 мкМ субстрата за 1 мин при установленной температуре. Активность целлюлолитического фермента можно рассчитать по формуле [12]:

$$\Phi A = \frac{PB \cdot \omega \cdot w}{0,18 \cdot t \cdot E},$$

где ΦA – ферментная активность, Ед/г или U/г; PB – редуцирующее вещество, мг/мл; ω – объем ферментного экстракта, мл; E – масса ферментируемого субстрата, г; $0,18$ – количество глюкозы (мг) в 1 mM; t – время реакции (1 ч).

Для определения сахаров использовали спектрофотометрический метод, основанный на взаимодействии сахаров с антроновым реактивом. Сущность метода заключается в расщеплении сложных углеводов до моносахаров в сильно кислой среде с последующей их дегидратацией и образованием гидроксиметилфурфуrolа, образующего при реакции с антроном комплексное соединение синевато-зеленого цвета. Интенсивность образовавшейся окраски прямо пропорциональна содержанию сахаров в реакционной среде. Пропорциональная зависимость интенсивности окраски от содержания сахаров в испытуемом растворе соблюдается в области концентраций моносахаров 0,02–0,10 мг/мл.

При реализации метода в пробирку помещали 3,0 мл раствора испытуемого препарата, охлаждали его в бане со льдом до 0 °С. При охлаждении осторожно приливали 6,0 мл 0,2 %-го антронового реактива, все перемешивали и немедленно нагревали на кипящей водяной бане в течение 5–15 мин. Затем смесь охлаждали и измеряли 2 оптические плотности испытуемого и стандартного растворов на спектрофотометре в максимуме поглощения при длине волны 625 нм в кювете с толщиной слоя 10 мм относительно раствора сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Масса выделенных полисахаридов при варьировании параметров экстракции представлена в табл. 2.

Таблица 2. Масса выделенных полисахаридов при варьировании соотношения биомасса/растворитель

Table 2. Mass of isolated polysaccharides with varying biomass/solvent ratio

Соотношение биомасса/ растворитель	Продолжительность экстракции, ч	Выход полисахаридов, г
Зеленые водоросли		
1:20	1,0	1,13±0,14
1:25	1,0	0,83±0,09
1:30	1,0	0,54±0,06
Бурые водоросли		
1:20	1,0	1,31±0,14
1:25	1,0	1,01±0,11
1:30	1,0	0,69±0,06
Красные водоросли		
1:20	1,0	1,02±0,13
1:25	1,0	0,76±0,08
1:30	1,0	0,51±0,06

Для оценки влияния температуры на эффективность экстракции полисахаридов температуру процесса устанавливали на уровне 20, 60 и 100 °C (рис.).

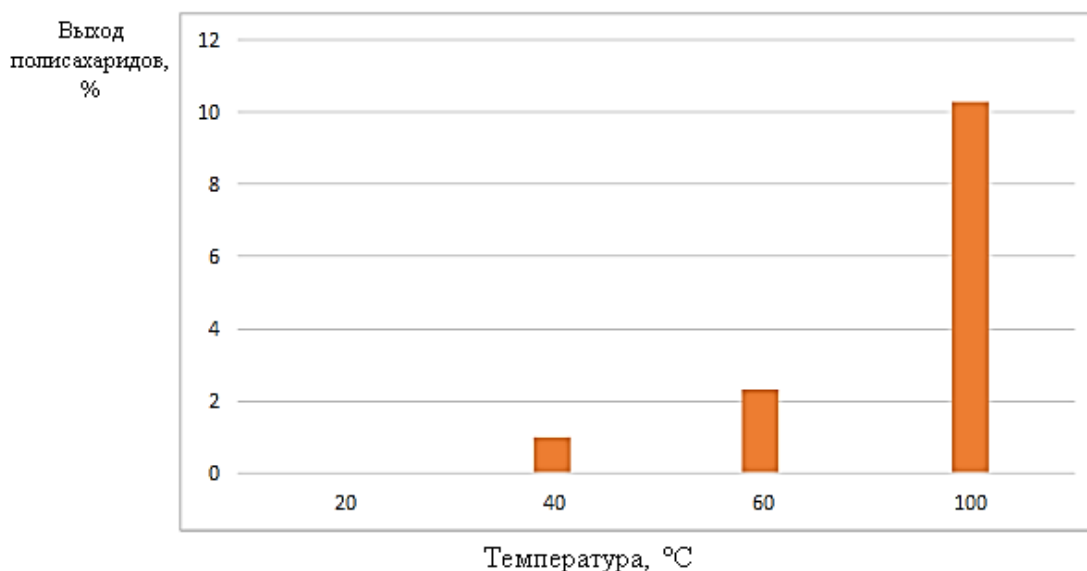


Рис. Влияние температуры экстракции на выход полисахаридов
Fig. Effect of extraction temperature on the yield of polysaccharides

Таким образом, необходимо провести развернутые исследования по оценке влияния продолжительности экстракции на выход полисахаридов. Полученные значения выхода полисахаридов при различной продолжительности процесса приведены в табл. 3.

Таблица 3. Масса выделенных полисахаридов при разной продолжительности экстракции

Table 3. Mass of isolated polysaccharides at different extraction times

Образец	Выход полисахаридов, г, при разной продолжительности экстракции			
	1 ч	2 ч	3 ч	4 ч
Зеленые водоросли	0,30±0,06	0,69±0,09	1,13±0,14	0,89±0,10
Бурые водоросли	0,36±0,06	0,75±0,09	1,31±0,14	1,05±0,11
Красные водоросли	0,28±0,06	0,57±0,09	1,02±0,13	0,77±0,09

Соотношение биомассы и экстрагента в эксперименте составило 1:20, продолжительность экстракции 3 ч (табл. 2, 3). Процесс экстракции при комнатной температуре не привел к выделению полисахаридов, а процент выхода продукта при 60 °C был незначительным. Содержание полисахаридов в экстрактах, выделенных при 100 °C, варьировало от 0,77±0,09 г для красных водорослей до 1,31±0,14 г для бурых водорослей в зависимости от продолжительности экстракции. Исходя из полученных данных сделан вывод о том, что увеличение массы получаемых полисахаридов прямо пропорционально увеличению продолжительности процесса экстракции.

Процентный расчет был выполнен относительно массы взятой навески гидробионтов (3,0 г). Минимальный выход полисахаридов (для красных водорослей) составил $0,28 \pm 0,06$ г, что соответствует 9,16 %, максимальный выход продукта – $1,13 \pm 0,14$ г при 3-х часовом процессе, что составляет 36,11 %. При продолжении извлечения масса полисахаридов уменьшилась и варьировала в пределах $0,77 \pm 0,09$ – $1,05 \pm 0,11$ г. Вероятнее всего, это связано с деструкцией биополимера. Таким образом, оптимальная продолжительность экстракции полисахаридов составила 3 ч.

Результаты эксперимента по ферментативному гидролизу полисахарида целлюлозы приведены в табл. 4. Параметры гидролиза: препарат «Целлюлаза ультра», продолжительность эксперимента 40 мин, соотношение сырья и воды 1:10, степень измельчения растений 1–5 мм, pH 12,5, массовая доля сырья 10 %, температура 180–220 °C, давление 1,0–2,0 МПа.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рациональными параметрами проведения ферментативной экстракции целлюлозы являются следующие: степень измельчения образца 0,1–0,5 см, температурный диапазон 180–200 °C, давление 1,0–1,5 Мпа. Подобранные условия позволяют получить волокна от светло-бежевого до коричневатого цвета без обугливания.

Установлено, что ферментативный гидролиз имеет несколько преимуществ перед химическим гидролизом. При ферментативном гидролизе деградация сахара не происходит, а сам процесс протекает при низких температурах, при этом отмечается высокий выход конечного продукта [13]. В настоящее время усилия исследователей в большей степени направлены на разработку способов ферментативного гидролиза растительного сырья с целью получения целлюлозы [14].

Таблица 4. Результаты эксперимента по проведению ферментативной экстракции целлюлозы

Table 4. Results of the experiment on enzymatic extraction of cellulose

Температура, °C	Давление, Мпа	Результаты	Выход сухой массы, г
180	1,0	Целлюлозное волокно бежевого цвета без обугливания	$0,318 \pm 0,06$
180	1,0		$0,401 \pm 0,06$
180	1,0		$0,215 \pm 0,06$
200	1,5	Целлюлозное волокно коричневатого цвета без обугливания	$0,435 \pm 0,06$
200	1,5		$0,479 \pm 0,06$
200	1,5		$0,401 \pm 0,06$
220	2,0	Целлюлозное волокно темно-коричневого цвета с признаками обугливания	$0,093 \pm 0,06$
220	2,0		$0,042 \pm 0,06$
220	2,0		$0,113 \pm 0,06$

Morán-Aguilar и соавторы [15] показали, что ферментативное производство целлюлозы является востребованным, поскольку не требует агрессивных химикатов, имеет более низкие энергетические потребности и является экологически устойчивым. Потребление энергии снижается за счет необходимости меньшей механической обработки и использования низких температур. После первоначальной

обработки можно применять более низкие температуры и более щадящее механическое воздействие. Ферментативный гидролиз также снижает потребление воды и образование опасных отходов.

Методы ферментативного гидролиза, предложенные Yazdi и др., эффективно устраняют необходимость в кислотах для производства целлюлозы, однако предварительная механическая обработка по-прежнему остается дорогостоящей, учитывая обработку для производства целлюлозы и предварительную обработку перед ферментативным гидролизом [16]. Zadorozhny и др. подробно изучили синергетическую природу ферментов целлюлаз и пришли к выводу, что для восстановления волокон целлюлозы требуется несколько видов целлюлаз [17]. Роль семейства эндоглюканаз целлюлаз заключается в ферментации менее упорядоченных областей подготовленного целлюлозного сырья, что делает кристаллические области более доступными для целлобиогидролаз, которые затем способны переваривать кристаллические области.

Ферментативный гидролиз целлюлозы и гемицеллюлоз происходит под воздействием не отдельных ферментов, а полиферментных систем, вырабатываемых грибами (например, рода *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Phanerochaete*, *Chaetomium*, *Humicola* и др.) и бактериями (*Clostridium*, *Cellulomonas*, *Thermomonospora*, *Microbiospora*, *Streptomyces* и др.) [18].

Гидролиз целлюлозы осуществляется под воздействием синергически действующего комплекса целлюлаз, включающего эндо-1,4-β-глюканазу (1,4-β-глюкан-глюкангидролазу, КФ 3.2.1.4), экзо-1,4-β-глюканазу (экзоцеллобиогидролазу или 1,4-β-D-глюкан-целлобиогидролазу, КФ 3.2.1.91), экзо-1,4-β-глюкозидазу (1,4-β-D-глюкан-гидролазу, КФ 3.2.1.74) и целлобиазу (β-глюкозидазу или β-D-глюкозид-глюкогидролазу, КФ 3.2.1.21), разрушающую целлобиозу до глюкозы [19].

В настоящее время проводятся исследования по применению ферментных препаратов для получения целлюлозы из водорослевого сырья и по получению высокоэффективных, в том числе мутантных штаммов микроорганизмов – продуцентов комплекса ферментов, обладающих высокой активностью по отношению к целлюлозе и гемицеллюлозам.

Получен ферментный препарат [20] на основе рекомбинантного штамма гриба *Penicillium verruculosum*, содержащий в своем составе полисахаридмонооксигеназу из *Myceliophora thermophila* с увеличенной гидролитической активностью к различным видам целлюлозосодержащего сырья (выход продуктов гидролиза из которых повышается на 40 %, а при гидролизе наиболее трудногидролизуемой целлюлозы – на 60 %). Использование смесей мутантных форм целлюлаз *Penicillium verruculosum* позволило увеличить выход микроцеллюлозы при ферментативном гидролизе целлюлозосодержащих материалов (измельченной осиновой древесины) на ~ 30 % по сравнению с композициями исходных ферментов такого же состава [20].

Wu и соавторами установлены основы механизма ферментативного гидролиза целлюлозосодержащего сырья [21], которые впоследствии были трансформированы другими авторами [22]. По современным представлениям [23], ферментативный гидролиз осуществляется при совместном и одновременном синергическом действии комплекса целлюлолитических ферментов, что увеличивает скорость и

глубину процесса гидролиза. Кроме того, важное значение при деструкции биополимеров растительного сырья имеет адсорбционное взаимодействие ферментов на поверхности субстратов [24].

Механизм ферментативного гидролиза гемицеллюлоз, имеющих в отличие от целлюлозы разветвленную структуру, гемицеллюлазами менее изучен. Авторы [25] считают, что для их ферментолитического расщепления необходимо синергическое действие целлюлаз и высокоспецифичных эндо-1,4-β-D-ксиланаз, экзо-1,4-β-D-ксилозидаз, эндо-1,4-β-D-маннаназ, α-галактозидаз и других ферментов, состав которых зависит от содержания в растительном сырье соответствующих гемицеллюлоз.

Известно, что на эффективность ферментативного гидролиза существенно влияют физико-химические и структурные факторы (величина удельной поверхности, доступной действию целлюлаз, и степень кристалличности – с увеличением степени кристалличности целлюлозы скорость процесса снижается) [26]. Кинетические расчеты показали [27], что скорость ферментативного гидролиза для получения целлюлозы с высокой кристалличностью определяется диффузией молекул фермента в субстрат. С уменьшением степени кристалличности целлюлозы вклад диффузии снижается, в то время как кинетический вклад в суммарную скорость процесса гидролиза возрастает.

Таким образом, теоретические представления о ферментативном гидролизе растительного сырья с целью получения целлюлозы свидетельствует о том, что эффективность этого процесса и состав получаемых продуктов в существенной степени зависят от особенностей структуры сырья, сбалансированности и активности целлюлазного комплекса ферментов, а также от применяемых методов гидролиза [28].

ВЫВОДЫ

Значительные выходы полисахаридов водорослей получали методом щелочной экстракции 2 %-м раствором гидроксида калия, использование большего объема растворителя не привело к увеличению выхода продукта. После выделения полисахаридов проводили гидролиз целлюлозы водорослей ферментом «Целлюлаза ультра», полученным путем направленной ферментации селекционного штамма *Trichoderma reesei* с последующей очисткой и концентрированием. Фермент направлен на гидролиз β-1,4-гликозидных связей в целлюлозе.

Для оценки влияния температуры на эффективность экстракции полисахаридов устанавливали температурный режим 20, 60 и 100 °C. Соотношение биомассы и экстрагента в эксперименте составило 1:20, продолжительность экстракции – 3 ч. Содержание полисахаридов в экстрактах, выделенных при 100 °C, варьировало от 0,77±0,09 г для красных водорослей до 1,31±0,14 г для бурых водорослей в зависимости от продолжительности экстракции. Минимальный выход полисахаридов (для красных водорослей) составил 0,28±0,06 г, что соответствует 9,16 %, максимальный выход продукта – 1,13±0,14 г при 3-х часовом процессе, что составляет 36,11 %. При продолжении извлечения масса полисахаридов уменьшилась и варьировала в пределах 0,77±0,09–1,05±0,11 г. Установлены оптимальные параметры гидролиза целлюлозы: ферментный препарат «Целлюлаза ультра», продолжительность эксперимента 40 мин, соотношение сырья и воды 1:10, степень измельчения растений 1–5 мм, pH 12,5, массовая доля сырья 10 %, температура 180–

220 °С, давление 1,0–2,0 МПа. Подобранные условия позволяют получить волокна от светло-бежевого до коричневатого цвета без обугливания.

В настоящее время целлюлоза имеет существенное применение в фармацевтической и пищевой промышленности в качестве разбавителей, смазочных материалов, дезинтеграторов, связующих веществ и покрытий при производстве таблеток и капсул.

Список источников

1. Projection of Changes in Coastal Water Temperature of the Baltic Sea up to 2100 / M. Ptak, M. Sojka, S. Haddout, T. Amnuaylojaroen. – DOI: 10.3390/forecast8010012 // Forecasting. – 2026. – № 8 (1). – P. 12.
2. Baltic Sea coastal sediment-bound eukaryotes have increased year-round activities under predicted climate change related warming / S. Li, E. Nilsson, L. Seidel [et al.]. – DOI: 10.3389/fmicb.2024.1369102 // Front Microbiol. – 2024. – № 15. – P. 1369102.
3. Marinho, E. Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications / E. Marinho. – DOI: 10.1016/j.scenv.2025.100283 // Sustainable Chemistry for the Environment. – 2025. – № 11. – P. 100283.
4. Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact / R. DALLAEV, N. Papež, M. M. Allaham [et al.]. – DOI: 10.3390/polym17141981 // Polymers (Basel). – 2025. – № 17 (14). – P. 1981.
5. Sayam, S. Natural fibers in sustainable materials: extraction technologies, fiber modification, and performance–sustainability relationships / S. Sayam. – DOI: 10.1039/d5ra09029f // RSC Adv. – 2026. – № 16. – P. 10495–10537.
6. Algal cellulose, production and potential use in plastics: Challenges and opportunities / E. Zanchetta, E. Damergi, B. Patel [et al.]. – DOI: 10.1016/j.algal.2021.102288 // Algal Research. – 2021. – № 56. – P. 102288.
7. Adawiyah, R. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from lembang (*Typha angustifolia* L.) / R. Adawiyah, V. Suryanti, I. Pranoto. – DOI: 10.1088/1742-6596/2190/1/012007 // J. Phys.: Conf. Ser. – 2022. – № 2190 (1). – P. 012007.
8. Beyzi, S. B. Chemical, fermentative, nutritive and anti-nutritive composition of common reed (*Phragmites australis*) plant and silage / S. B. Beyzi, I. Ülger, Y. Konca. – DOI: 10.1007/s12649-022-01903-w // Waste and Biomass Valorization. – 2023. – № 14. – P. 927–936.
9. Lai, W.-F. Biodegradable polymer films incorporating aggregation-induced emission luminogens for smart food packaging / W.-F. Lai. – DOI: 10.1039/D5FB00636H // Sustainable Food Technol. – 2026. – № 4. – P. 1211–1224.
10. Şomoghi, R. An Overview of Bio-Based Polymers with Potential for Food Packaging Applications / R. Şomoghi, S. Mihai, F. Oancea. – DOI: 10.3390/polym17172335 // Polymers. – 2025. – № 17 (17). – P. 2335.
11. Hydrothermal liquefaction of *Miscanthus* × *Giganteus*: Preparation of the ideal feedstock / E. Lappa, P. S. Christensen, M. Klemmer [et al.]. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.02.008 // Biomass and Bioenergy. – 2016. – № 87. – P. 17–25.
12. Zhao, C. Mixed culture of recombinant *Trichoderma reesei* and *Aspergillus niger* for cellulase production to increase the cellulose degrading capability / C. Zhao,

- L. Deng, H. Fang. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.03.001 // Biomass and Bioenergy. – 2018. – № 112. – P. 93–98.
13. Influence of Enzymatic Hydrolysis on Composition and Technological Properties of Black Currant (*Ribes nigrum*) Pomace / A. Kairè, J. Jagelavičiūtė, L. Bašinskienė [et al.]. – DOI: 10.3390/app15116207 // Applied Sciences. – 2025. – № 15 (11). – P. 6207.
14. Enzymatic hydrolysis and microbial fermentation: The most favorable biotechnological methods for the release of bioactive peptides / D. E. Cruz-Casas, C. N. Aguilar, J. A. Ascacio-Valdés [et al.]. – DOI: 10.1016/j.fochms.2021.100047 // Food Chem (Oxf). – 2021. – № 3. – P. 100047.
15. Advancing Sustainable Production of High-Performance Cellulose Pulps / M. G. Morán-Aguilar, I. Costa-Trigo, G. A. Bastida [et al.]. – DOI: 10.3390/ma18214968 // Materials. – 2025. – № 18 (21). – P. 4968.
16. Yazdi, E. J. Pretreatment and enzymatic hydrolysis of tertiary cellulose for glucose production / E. J. Yazdi, G.-J. W. Euverink, J. Yue. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.122144 // Industrial Crops and Products. – 2025. – № 237. – P. 122144.
17. Cellulases: key properties, natural sources, and industrial applications / A. V. Zadorozhny, N. M. Slynko, S. V. Bannikova [et al.]. – DOI: 10.18699/vjgb-25-141 // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. – 2025. – № 25 (8). – P. 1348–1360.
18. Isolation of cellulolytic bacteria from the intestine of *Diatraea saccharalis* larvae and evaluation of their capacity to degrade sugarcane biomass / K. I. Dantur, R. Enrique, B. Welin [et al.]. – DOI: 10.1186/s13568-015-0101-z // AMB Express. – 2015. – № 25 (5). – P. 15.
19. Рабинович, М. Л. Целлюлазы микроорганизмов / М. Л. Рабинович, М. С. Мельник, А. В. Болобова // Прикладная биохимия и микробиология. – 2002. – Т. 38. – № 4. – С. 355–373.
20. Ферментативный гидролиз целлюлозы смесями мутантных форм целлюлаз *Penicillium verruculosum* / А. С. Доценко, А. В. Гусаков, А. М. Рожкова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. – 2018. – № 2. – Текст: электронный. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fermentativnyy-gidroliz-tsellyulozysmesyami-mutantnyh-form-tsellyulaz-penicillium-verruculosum> (дата обращения: 02.05.2026).
21. The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis / W. Wu, P. Li, L. Huang [et al.]. – DOI: 10.3390/biomass3010007 // Biomass. – 2023. – № 3 (1). – P. 96–107.
22. Baig, K. S. Interaction of enzymes with lignocellulosic materials: causes, mechanism and influencing factors / K. S. Baig. – DOI: 10.1186/s40643-020-00310-0 // Bioresour. Bioprocess. – 2020. – № 7. – P. 21.
23. Hu, J. The synergistic action of accessory enzymes enhances the hydrolytic potential of a «cellulase mixture» but is highly substrate specific / J. Hu, V. Arantes, A. Pribowo [et al.]. – DOI: 10.1186/1754-6834-6-112 // Biotechnol Biofuels. – 2013. – № 6 (1). – P. 112.
24. Emerging Roles of Biopolymers in Seed Science and Technology / A. M. Velusamy, S. Rathinavelu, V. Shanmugam [et al.]. – DOI: 10.1002/bip.70056 // Biopolymers. – 2025. – № 116 (6). – Article e70056.

25. Current Trends of Cellulosic Ethanol Technology from the Perspective of Industrial Development / G. K. S. Santos, C. E. de Farias Silva, B. M. V da Gama [et al.]. – DOI: 10.3390/fermentation12010048 // Fermentation. – 2026. – № 12 (1). – P. 48.
26. Decreasing the Crystallinity and Degree of Polymerization of Cellulose Increases Its Susceptibility to Enzymatic Hydrolysis and Fermentation by Colon Microbiota / K. Thielemans, Y. De Bondt, L. Comer [et al.]. – DOI: 10.3390/foods12051100 // Foods. – 2023. – № 12 (5). – P. 1100.
27. Koo, B. Drying Effect on Enzymatic Hydrolysis of Cellulose Associated with Porosity and Crystallinity / B. Koo, J. Jo, S.-M. Cho. – DOI: 10.3390/app10165545 // Applied Sciences. – 2020. – № 10 (16). – P. 5545.
28. Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass: Structural Features, Process Aspects, Kinetics, and Computational Tools / D. Santos, J. G. W. Siqueira, M. G. L. da Silva [et al.]. – DOI: 10.3390/biomass6010013 // Biomass. – 2026. – № 6 (1). – P. 13.

References

1. Projection of Changes in Coastal Water Temperature of the Baltic Sea up to 2100 / M. Ptak, M. Sojka, S. Haddout, T. Amnuaylojaroen. – DOI: 10.3390/forecast8010012 // Forecasting. – 2026. – № 8 (1). – P. 12.
2. Baltic Sea coastal sediment-bound eukaryotes have increased year-round activities under predicted climate change related warming / S. Li, E. Nilsson, L. Seidel [et al.]. – DOI: 10.3389/fmicb.2024.1369102 // Front Microbiol. – 2024. – № 15. – P. 1369102.
3. Marinho, E. Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications / E. Marinho. – DOI: 10.1016/j.scenv.2025.100283 // Sustainable Chemistry for the Environment. – 2025. – № 11. – P. 100283.
4. Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact / R. Dallaev, N. Papež, M. M. Allaham [et al.]. – DOI: 10.3390/polym17141981 // Polymers (Basel). – 2025. – № 17 (14). – P. 1981.
5. Sayam, S. Natural fibers in sustainable materials: extraction technologies, fiber modification, and performance–sustainability relationships / S. Sayam. – DOI: 10.1039/d5ra09029f // RSC Adv. – 2026. – № 16. – P. 10495–10537.
6. Algal cellulose, production and potential use in plastics: Challenges and opportunities / E. Zanchetta, E. Damergi, B. Patel [et al.]. – DOI: 10.1016/j.algal.2021.102288 // Algal Research. – 2021. – № 56. – P. 102288.
7. Adawiyah, R. Preparation and characterization of microcrystalline cellulose from lembang (*Typha angustifolia* L.) / R. Adawiyah, V. Suryanti, I. Pranoto. – DOI: 10.1088/1742-6596/2190/1/012007 // J. Phys.: Conf. Ser. – 2022. – № 2190 (1). – P. 012007.
8. Beyzi, S. B. Chemical, fermentative, nutritive and anti-nutritive composition of common reed (*Phragmites australis*) plant and silage / S. B. Beyzi, I. Ülger, Y. Konca. – DOI: 10.1007/s12649-022-01903-w // Waste and Biomass Valorization. – 2023. – № 14. – P. 927–936.
9. Lai, W.-F. Biodegradable polymer films incorporating aggregation-induced emission luminogens for smart food packaging / W.-F. Lai. – DOI: 10.1039/D5FB00636H // Sustainable Food Technol. – 2026. – № 4. – P. 1211–1224.

10. Şomoghi, R. An Overview of Bio-Based Polymers with Potential for Food Packaging Applications / R. Şomoghi, S. Mihai, F. Oancea. – DOI: 10.3390/polym17172335 // Polymers. – 2025. – № 17 (17). – P. 2335.
11. Hydrothermal liquefaction of *Miscanthus* × *Giganteus*: Preparation of the ideal feedstock / E. Lappa, P. S. Christensen, M. Klemmer [et al.]. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.02.008 // Biomass and Bioenergy. – 2016. – № 87. – P. 17–25.
12. Zhao, C. Mixed culture of recombinant *Trichoderma reesei* and *Aspergillus niger* for cellulase production to increase the cellulose degrading capability / C. Zhao, L. Deng, H. Fang. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.03.001 // Biomass and Bioenergy. – 2018. – № 112. – P. 93–98.
13. Influence of Enzymatic Hydrolysis on Composition and Technological Properties of Black Currant (*Ribes nigrum*) Pomace / A. Kairė, J. Jagelavičiūtė, L. Bašinskienė [et al.]. – DOI: 10.3390/app15116207 // Applied Sciences. – 2025. – № 15 (11). – P. 6207.
14. Enzymatic hydrolysis and microbial fermentation: The most favorable biotechnological methods for the release of bioactive peptides / D. E. Cruz-Casas, C. N. Aguilar, J.A. Ascacio-Valdés [et al.]. – DOI: 10.1016/j.fochms.2021.100047 // Food Chem (Oxf). – 2021. – № 3. – P. 100047.
15. Advancing Sustainable Production of High-Performance Cellulose Pulps / M. G. Morán-Aguilar, I. Costa-Trigo, G. A. Bastida [et al.]. – DOI: 10.3390/ma18214968 // Materials. – 2025. – № 18 (21). – P. 4968.
16. Yazdi, E. J. Pretreatment and enzymatic hydrolysis of tertiary cellulose for glucose production / E. J. Yazdi, G.-J. W. Euverink, J. Yue. – DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.122144 // Industrial Crops and Products. – 2025. – № 237. – P. 122144.
17. Cellulases: key properties, natural sources, and industrial applications / A. V. Zadorozhny, N. M. Slynko, S. V. Bannikova [et al.]. – DOI: 10.18699/vjgb-25-141 // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2025. – № 25 (8). – P. 1348–1360.
18. Isolation of cellulolytic bacteria from the intestine of *Diatraea saccharalis* larvae and evaluation of their capacity to degrade sugarcane biomass / K. I. Dantur, R. Enrique, B. Welin [et al.]. – DOI: 10.1186/s13568-015-0101-z // AMB Express. – 2015. – № 25 (5). – P. 15.
19. Rabinovich, M. L. Cellulases of microorganisms / M. L. Rabinovich, M. S. Melnik, A. V. Bolobova // Applied biochemistry and microbiology. – 2002. – Vol. 38. – № 4. – P. 355–373.
20. Enzymatic hydrolysis of cellulose with mixtures of mutant forms of *Penicillium verruculosum* cellulases / A. S. Dotsenko, A. V. Gusakov, A. M. Rozhkova [et al.] // Bulletin of Moscow University. Series 2: Chemistry. – 2018. – № 2. – Text: electronic. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fermentativnyy-gidroliz-tsellyulozysmesyami-mutantnyh-form-tsellyulaz-penicillium-verruculosum> (accessed on 02.05.2026).
21. The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis / W. Wu, P. Li, L. Huang [et al.]. – DOI: 10.3390/biomass3010007 // Biomass. – 2023. – № 3 (1). – P. 96–107.
22. Baig, K. S. Interaction of enzymes with lignocellulosic materials: causes, mechanism and influencing factors / K. S. Baig. – DOI: 10.1186/s40643-020-00310-0 // Bioresour. Bioprocess. – 2020. – № 7. – P. 21.

23. Hu, J. The synergistic action of accessory enzymes enhances the hydrolytic potential of a «cellulase mixture» but is highly substrate specific / J. Hu, V. Arantes, A. Pribowo [et al.]. – DOI: 10.1186/1754-6834-6-112 // *Biotechnol Biofuels*. – 2013. – № 6 (1). – P. 112.

24. Emerging Roles of Biopolymers in Seed Science and Technology / A. M. Velusamy, S. Rathinavelu, V. Shanmugam [et al.]. – DOI: 10.1002/bip.70056 // *Biopolymers*. – 2025. – № 116 (6). – Article e70056.

25. Current Trends of Cellulosic Ethanol Technology from the Perspective of Industrial Development / G. K. S. Santos, C. E. de Farias Silva, B. M. V da Gama [et al.]. – DOI: 10.3390/fermentation12010048 // *Fermentation*. – 2026. – № 12 (1). – P. 48.

26. Decreasing the Crystallinity and Degree of Polymerization of Cellulose Increases Its Susceptibility to Enzymatic Hydrolysis and Fermentation by Colon Microbiota / K. Thielemans, Y. De Bondt, L. Comer [et al.]. – DOI: 10.3390/foods12051100 // *Foods*. – 2023. – № 12 (5). – P. 1100.

27. Koo, B. Drying Effect on Enzymatic Hydrolysis of Cellulose Associated with Porosity and Crystallinity / B. Koo, J. Jo, S.-M. Cho. – DOI: 10.3390/app10165545 // *Applied Sciences*. – 2020. – № 10 (16). – P. 5545.

28. Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulosic Biomass: Structural Features, Process Aspects, Kinetics, and Computational Tools / D. Santos, J. G. W. Siqueira, M. G. L. da Silva [et al.]. – DOI: 10.3390/biomass6010013 // *Biomass*. – 2026. – № 6 (1). – P. 13.

Информация об авторе

Е. В. Ульрих – доктор технических наук, доцент

Information about the author

E. V. Ulrikh – Doctor of Engineering, Associate Professor

Статья поступила в редакцию 13.05.2026; одобрена после рецензирования 23.05.2026; принята к публикации 07.06.2026.

The article was submitted 13.05.2026; approved after reviewing 23.05.2026; accepted for publication 07.06.2026.

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

