Химия растительного сырья. 2026. №4. Online First.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2026, no. 4, Online First.
DOI: 10.14258/jcprm.20260417484

УДК 582.284:544.723

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ХИТИНСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ДЕРЕВОРАЗРУШАЮЩЕГО ГРИБА ВИДА *FOMES FOMENTARIUS*

© ***О.С. Бровко, Д.В. Жильцов*, Т.А. Бойцова***

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, пр. Никольский, 20, Архангельск, 163020, Россия, dnorton.usa@gmail.com

Статья посвящена исследованию свойств хитинсодержащего комплекса дереворазрушающего гриба вида *Fomes fomentarius,* выделенного методом кислотно-щелочного гидролиза. Целью работы являлось выделение хитинсодержащего комплекса из биомассы плодового тела гриба вида *Fomes fomentarius*, изучение его химической структуры и сорбционных свойств. Методом кислотно-щелочного гидролиза получен хитинсодержащий комплекс, содержащий 22% хитина, 55% других полисахаридов (в частности, глюкан, целлюлоза, гемицеллюлозы), 22.5% полифенолов и 0.45% белковых веществ. Методами элементного анализа и ИК-спектроскопии установлено, что полученный биополимерный комплекс гриба содержит хитин. Показано, что на поверхности хитинсодержащего комплекса присутствуют как кислотные (pK_a = 2.6; 4.1 и 5.2), так и основные (pK_a = 9.1 и 12.4) центры связывания. Хитинсодержащий комплекс эффективно адсорбирует как ионы тяжелых металлов: медь (4.52 ммоль/г), кобальт (3.76 ммоль/г), серебро (1.75 ммоль/г), ртуть (0.96 ммоль/г), никель (1.03 ммоль/г), так и органические красители: катионный метиленовый синий (1.09 ммоль/г) и анионный конго красный (0.45 ммоль/г). Кислотно-основные свойства поверхности и способность хитинсодержащего комплекса к сорбции разнозарядных соединений свидетельствуют о его полиамфолитной природе. Установлено, что хитинсодержащий комплекс гриба обладает бактериостатическими и адсорбционными свойствами в отношении штамма грамотрицательной бактерии *Escherichia coli* 4912/41: при его добавлении в концентрации от 10 до 50 мг наблюдалось уменьшение концентрации микроорганизмов со 100 млн кл./мл до 33.3 млн кл./мл.

Ключевые слова: хитинсодержащий комплекс, дереворазрушающий гриб, кислотно-основные свойства поверхности, тяжелые металлы, метиленовый синий, конго красный.

Для цитирования: Бровко О.С., Жильцов Д.В., Бойцова Т.А. Особенности структуры и сорбционных свойств хитинсодержащих материалов из дереворазрушающего гриба вида *Fomes fomentarius* // Химия растительного сырья. 2026. №4. Online First. https://doi.org/10.14258/jcprm.20260417484.

Введение

Использование биологически активных веществ (БАВ), обладающих сорбционными свойствами, в ежедневном рационе питания позволяет решать многочисленные задачи, основными из которых являются: повышение резистентности организма к неблагоприятным факторам внешней среды; связывание и выведение из организма токсичных продуктов жизнедеятельности микроорганизмов (микроскопических грибков и бактерий), а также токсичных соединений (тяжелые металлы – ТМ, фенол, индол и др.), поступающих извне [1].

Одним из способов снижения негативного воздействия токсинов различной природы и ионов ТМ на организм животных и человека является введение в рацион пищевых добавок, в состав которых входят сорбенты (энтеросорбенты). Они представляют собой неабсорбируемые организмом вещества, способные образовывать комплексы с токсинами различной природы. К основным преимуществам таких веществ относятся высокая сорбционная способность, связывание эндогенных и экзогенных токсических веществ и низкая всасываемость в системный кровоток [2]. По происхождению сорбенты подразделяются на углеродные (в частности, препарат Зоокарб, активированный уголь), алюмосиликаты (бентонит, цеолит, филлосиликаты

* Автор, с которым следует вести переписку.

и др.), природные сорбенты (пектин, целлюлоза), а также синтетические полимеры, такие как холестирамин и поливинилпирролидон и их производные [3].

Среди углеводных сорбентов особое место занимает хитин (ХТ) и его производное хитозан. ХТ обладает свойствами комплексообразователя, способного прочно связывать экзогенные и эндогенные токсины во внутренних средах организма человека, в том числе эндотоксины малой и средней молекулярной массы, образующиеся при воспалительных процессах любой этиологии, обострениях аллергических состояний и др., а также катионы ТМ и радионуклиды.

ХТ входит в состав экзоскелета членистоногих, клеточной стенки грибов, некоторых видов водорослей и бактерий [4]. Перспективным источником получения сорбентов на основе ХТ являются грибы. ХТ грибного происхождения по сравнению с полимером животного происхождения обладает более однородной молекулярной массой, вязкостью растворов и распределением заряда полимерной цепи. Содержание ХТ в клеточных стенках высших грибов составляет от 5.2 до 80%, для низших грибов – 0.2–26.2% [5]. В клеточной стенке высших грибов ХТ находится в виде хитин-глюканового комплекса, в котором он ковалентно связан с нерастворимыми в щелочи β-1,3- и β-1,6-глюканами [6].

Хитинсодержащие комплексы (ХСК) грибов представляют собой многокомпонентную систему, в которую помимо хитина и глюкана входят другие полисахариды (целлюлоза, гемицеллюлозы), а также полифенолы (лигнин и меланин). Эти комплексы обладают адсорбционными свойствами и могут использоваться для эффективного извлечения токсинов различной природы, в том числе ионов ТМ [7, 8]. ХСК проявляют более высокую, чем у чистого ХТ, хелатообразующую способность благодаря специфическому стерическому размещению амино- и гидроксильных групп в комплексе, а также рыхлой аморфной структуре. Наличие в структуре ХСК помимо хитина, других полисахаридов, а также полифенолов обеспечивает дополнительное количество функциональных групп, способных участвовать в образовании хелатных комплексов, что дает возможность получать производные с широким спектром свойств и применением [9].

Традиционно для выделения ХСК из высших базидиомицетов применяют многостадийные схемы последовательной кислотно-щелочной обработки, заключающиеся в удалении белка (стадия депротеинирования), минеральных компонентов (деминерализации) и красящих веществ (депигментация).

Дереворазрушающие (трутовые) грибы составляют отдельную группу базидиомицетов. Так, некоторые виды дереворазрушающих грибов (*Fomes fomentarius*, *Piptoporus betulinus*, *Auricularia auricula-juda*, *Lentinula edodes*, *Pleurotus ostreatus*) содержат от 1.42 до 15% ХТ [6, 10]. Трутовик *F. fomentarius* широко произрастает в умеренных широтах Северо-Запада России. Исследований, направленных на выделение, изучение физико-химических свойств и биологической активности ХСК данного вида гриба крайне мало [11].

Таким образом, целью работы являлось выделение хитинсодержащего комплекса из биомассы плодового тела гриба вида *Fomes fomentarius,* изучение его химической структуры и сорбционных свойств.

Экспериментальная часть

ХСК выделяли из трутового гриба вида *Fomes fomentarius* (L.) Fr., отобранного в смешанном лесу на территории Приморского района Архангельской области. *F. fomentarius* – прочный многолетний полип, который с возрастом принимает форму копыта, он является паразитическим и сапрофитным организмом, заселяющим в основном лиственные породы древесины.

Одной из важнейших характеристик исходного сырья, используемого в качестве источника природных сорбентов, является его компонентный состав. Определение содержания основных компонентов биомассы гриба и ХСК проводили традиционными методами, применяемыми в химии растительного сырья. Влажность и зольность биообъектов определяли по методикам [12, 13], содержание экстрактивных веществ – по Сокслету с использованием этилового спирта концентрацией 96% [14]. Содержание лигнина оценивали по методу Класона в модификации Комарова [14], гемицеллюлозных полисахаридов (пентозанов) – фенольным способом после предварительного гидролиза [15], целлюлозы – азотно-спиртовым методом по Кюшнеру [14]. Определение содержания меланина проводили методом депигментации раствором аммиака в присутствии пероксида водорода [16]. Содержание белков в исследуемых объектах определяли по методу Лоури [17], в качестве стандарта использовали кристаллический альбумин (Sigma-Aldrich). Содержание хитина в биомассе гриба и ХСК оценивали методом Эльсона-Моргана с применением спектрального анализа в видимой области спектра по образованию хромогенов между продуктами кислотного гидролиза

биообъектов, щелочным раствором ацетилацетона и реактивом Эрлиха (4-диметиламинобензальдегид), в качестве стандарта применяли D-глюкозамин гидрохлорид (Sigma-Aldrich) [18].

ХСК из биомассы плодового тела гриба получали методом кислотно-щелочного гидролиза (КЩГ). Биомассу гриба предварительно размалывали на лабораторной мельнице VLM (Вилитек, Россия). Для кислотно-щелочной обработки использовали фракцию размером 0.2–0.5 мм, составляющую 80% от размолотого образца. Для выделения ХСК применяли двухстадийную последовательную обработку: первая стадия деминерализации (обработка раствором 2 М HCl, гидромодуль 1 : 15, температура 85 °С, продолжительность 4 ч), вторая стадия депротеинизации (обработка раствором 2 М NaOH, гидромодуль 1 : 20, температура 60 °С, продолжительность 4 ч). После каждой стадии предусмотрена промывка дистиллированной водой до pH 7.

Элементный анализ биомассы гриба и ХСК проводили на установке Elementar Vario Micro CUBE (Elementar, Германия). Определение функциональных групп в образцах осуществляли с помощью ИК Фурье-спектрометра IRAFFINITY-1 (Shimadzu, Япония). Спектры снимали с порошкообразной пробы, спрессованной с KBr. Диапазон сканирования составлял от 4000 до 400 $см^{-1}$, число сканирований 50, разрешение 4 $см^{-1}$.

Для изучения распределения кислотных и основных центров адсорбции на поверхности ХСК использовали метод Гаммета с применением 16 индикаторов со значениями pK_a -4.4…+16.8 [19].

Исследование сорбционных свойств ХСК относительно ионов ТМ (медь, кобальт, никель, ртуть и серебро) проводили в статических условиях при комнатной температуре. Для определения концентрации ионов ТМ в растворах после адсорбции использовали титриметрический метод количественного анализа [20].

Сорбционную способность ХСК по отношению к эталонным красителям – метиленовому синему (МС) и конго красному (КК), являющихся аналогами эндотоксинов средней и малой молекулярных масс, оценивали статическим методом [21]. Остаточное содержание красителей в растворе после сорбции определяли на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 при длине волны 400 нм (МС) и 500 нм (КК) в кюветах с толщиной поглощающего слоя 10 мм. Сорбционную емкость (СЕ, мг/г) вычисляли по формуле:

$$CE = \frac{(C_1 - C_2) \cdot 0.025}{m},$$

где C_1 (C_2) – массовая концентрация исходного раствора красителя (красителя после сорбции), мг/л; 0.025 – объем раствора красителя, взятый для сорбции, л; m – масса сорбента, г.

Исследование антибактериальной активности образца ХСК проводили в отношении грамотрицательной бактерии *Escherichia coli* (штамм 4912/41), полученной из ГБУАО «Архангельская областная ветеринарная лаборатория». Свежие культуры *E. coli* для эксперимента готовили следующим образом: суточные агаровые культуры переносили петлей в стерильную емкость с физиологическим раствором до образования гомогенной суспензии микроорганизмов. Далее проводили три серии экспериментов с культурой *E. coli*. В первой серии готовили 6 пробирок с физиологическим раствором, во второй – 6 пробирок с забуференной пептонной водой с добавлением в каждую пробирку суспензии микроорганизмов, содержащей до 100 млн бактериальных клеток в 1 мл по стандарту мутности McFarland (0.5 Ед.). В третьей серии экспериментов проводили посевы по 1 мл из исходных растворов гомогенных суспензий микроорганизмов в 6 чашек Петри со средой Эндо. В пробирки с физиологическим раствором, пептонной водой и в чашки Петри со средой Эндо были добавлены навески образца ХСК массой 10, 20, 30, 40, 50 мг и одна пробирка (чашка Петри) без образца являлась контрольной. Затем проводили инкубирование в течение 24 ч при температуре 37 °С. В ходе эксперимента регистрировали наличие роста (помутнение) или задержку роста в изучаемой среде.

Для количественной оценки воздействия ХСК гриба на культуру бактерии *E. coli* готовили 3 пробирки с забуференной пептонной водой при добавлении в каждую пробирку суспензии микроорганизмов, содержащей до 40 млн. кл./мл (по шкале мутности 0.2–0.25 Ед.), в две пробирки добавляли 30 и 50 мг ХСК, одна оставалась контрольной. При количественной оценке использовали метод предельных разведений (от 10^{-4} до 10^{-7}). Для произведения подсчета микроорганизмов в чашках Петри были проведены посевы глубинным способом из каждого разведения на питательный агар СПА из контрольных пробирок и пробирок с добавлением ХСК. Инкубация проводилась при 37 °С в течение 24 ч.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ MS Excel, 2010. Представленные данные являются средними значениями, полученными в независимых экспериментах при 3–6 параллельных измерениях в каждом опыте, отклонение между усредняемыми величинами не превышало 5%отн.

Результаты и их обсуждение

Компонентный состав исходной биомассы гриба *F. fomentarius* представлен в таблице 1. Влажность образца составила 13.2±1.0%, зольность (содержание минеральных компонентов) – 1.0±0.1%.

Выполненный анализ показал, что гриб имеет сложный химический состав и содержит такие компоненты как: углеводы (хитин, целлюлоза и гемицеллюлозы), высокомолекулярные соединения фенольной природы (лигнин и меланин), а также белковые и низкомолекулярные экстрактивные вещества. Экстрактивные вещества гриба представлены липидами, широким спектром низкомолекулярных фенольных соединений, а также стероидов, так основной стероид гриба – эргостерол обладает антиоксидантными и противовоспалительными свойствами и является предшественником витаминов D_2 и D [22].

В клеточной стенке гриба хитин образует прочно связанный комплекс с другими полисахаридами, которые совместно составляют более 50% плодового тела гриба. Не менее важной группой веществ являются полифенолы – лигнин и меланин. Их доля в биомассе гриба составляет 26.8%.

Из биомассы гриба методом КЩГ получен ХСК с выходом 18.5%, содержащий 22% ХТ, 55.0% других полисахаридов (в частности, глюкан, целлюлоза, гемицеллюлозы), 22.5% полифенолов и белковых веществ 0.45%.

Элементный состав биомассы гриба и ХСК представлен в таблице 2.

Установлено, что содержание азота в ХСК в 4.7 раза выше, чем в биомассе гриба. Показано также увеличение содержания ХТ в ХСК в 4.9 раз (до 22%). Полученные данные свидетельствуют о том, что азот в ХСК преимущественно входит в состав ХТ, что согласуется с результатами компонентного анализа данного комплекса.

С привлечением метода ИК-спектроскопии (рис. 1) показан полифункциональный характер ХСК гриба. В качестве образца сравнения выступал ХТ из панцирей креветок *Pandalus borealis* производства Sigma-Aldrich (каталожный номер C 7170).

В ИК-спектре ХТ из панцирей креветок *P. borealis* присутствуют полосы поглощения в области 1650–1560 $см^{-1}$ (поглощение первичных аминогрупп); 3260–3300 $см^{-1}$ (валентные колебания N-H группы, вовлеченной в водородную связь); 2916–2930 и 1450–1150 $см^{-1}$ (поглощение группы C-H); 1150–1000 $см^{-1}$ (поглощение гликозидной связи C-O-C); 1260–1200 $см^{-1}$ (деформационные колебания группы OH).

Таблица 1. Содержание основных компонентов в плодовом теле гриба *F. fomentarius*

Компонент	Содержание, % от а.с.в.*
Экстрактивные вещества	7.4±0.5
Белок	1.1±0.1
Полисахариды:	
– Хитин	4.5±0.2
– Целлюлоза	39.5±1.5
– Гемицеллюлозы	6.5±0.7
Полифенолы:	
– Меланин	10.0±0.8
– Лигнин Класона	16.8±0.9

*абсолютно-сухое вещество.

Таблица 2. Элементный состав биомассы плодового тела гриба и ХСК

Образец	Элемент ± Δ, %			
	N	C	H	O
Плодовое тело	0.33±0.20	58.3±0.9	5.7±0.3	35.69
ХСК	1.54±0.50	53.3±0.6	6.9±0.7	34.45

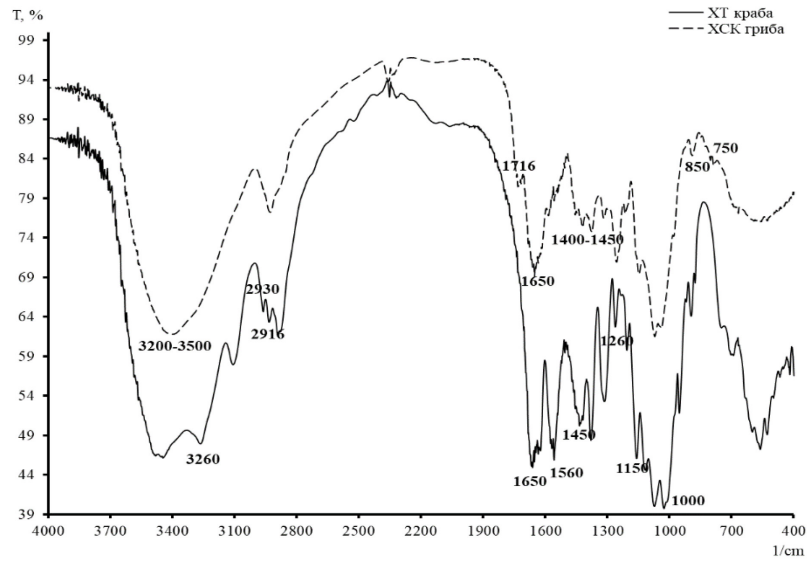


Рис. 1. ИК-спектры ХТ креветки и ХСК гриба

В ИК-спектре ХСК присутствуют все полосы поглощения, характерные для ХТ, однако наблюдаются некоторые смещения этих полос или их перекрывание, что обусловлено присутствием в составе ХСК помимо ХТ других сопутствующих компонентов (полисахариды, полифенолы). Отмечается также слабое поглощение в областях 750–760 и 870–880 $см^{-1}$, соответствующее деформационным колебаниям С-Н связи и пульсационным колебаниям пиранозного кольца в β-сахарах, что говорит о присутствии глюканов в составе ХСК. В ИК-спектре ХСК также отмечены полосы поглощения группы С=О при 1716–1732 и 1650 $см^{-1}$, которая накладываются на полосы группы NH_2 [18]. Появляются дополнительные полосы поглощения первичных аминов 1614 $см^{-1}$ и карбоксильных групп 1450–1400 $см^{-1}$, что связано с наличием в структуре ХСК прочно связанных белков и полифенолов. В спектрах ХТ и ХСК присутствует широкая полоса в области 3200–3500 $см^{-1}$ (валентные колебания связи О-Н), характерная для полифенолов, входящих в состав биомассы гриба [23] и частично сохранившихся в составе ХСК. Присутствие соединений ароматической природы подтверждается также наличием в спектре ХСК полосы в области 1600 $см^{-1}$, отвечающей за колебание связи С-Н ароматического кольца.

Для исследования поверхности ХСК с целью определения количества функциональных групп (центров адсорбции) использовали индикаторный метод Гаммета. Результаты исследований представлены на рисунке 2 в виде кривой распределения центров адсорбции (РЦА) на поверхности ХСК в водной среде (кислотно-основный спектр).

Установлено, что на поверхности ХСК в водном растворе образуются как кислотные центры Бренстеда со значениями pK_a: 2.6; 4.1; 5.2; так и основные центры с pK_a: 9.1 и 12.4. Группы с pK_a = 2.6 (0.102 ммоль/г) являются аминогруппами в молекуле ХТ как структурообразующего компонента клеточной стенки грибов [24]. Катионообменные группы в области pK_a ~ 3.8–4.6 могут быть отнесены к карбоксильным группам уроновых и ароматических кислот [24].

Область значений pK_a ~ 8.8–9.7 относится к аминогруппам в аминокислотах белков [25]. Область значений pK_a = 10–12.4 может быть отнесена к фенольным ОН-группам ХСК (входят в структуру меланина и лигнина), т.к. для простого фенола pK_a = 9.98 [26].

Присутствие как кислотных, так и основных центров на поверхности ХСК свидетельствует об его полиамфолитной природе.

В таблице 3 представлены результаты исследования сорбционной способности ХСК в сравнении с биомассой гриба относительно ряда ионов ТМ и модельных органических красителей. Выбор катионов ТМ обусловлен их высокой распространенностью в объектах окружающей среды и токсичностью по отношению к живым организмам. Медь является жизненно важным элементом, входящим в структуру витаминов, гормонов, ферментов, пигментов, участвует в процессах обмена веществ, тканевом дыхании, однако при избытке меди проявляются расстройства центральной нервной системы, нарушения функции печени, риск развития

атеросклероза [27]. Кобальт является незаменимым компонентом нескольких ферментов и коферментов, вместе с тем хроническое отравление соединениями кобальта вызывает токсические эффекты, активируются процессы мутагенеза, канцерогенеза и некроза тканей, функциональные расстройства щитовидной железы, повышенный риск кардиомиопатии, энцефалопатии и врожденных пороков развития [28]. Никель и его соединения оказывают влияние на перекисное окисление липидов, функцию печени и почек, показатели крови, вызывая ускоренную гибель эритроцитов, кроме того, никель является одним из распространенных аллергенов, вызывая воспаления кожных покровов, в тяжелых случаях отек легких и мозга [29]. Ртуть является высокотоксичным элементом, причем ее соединения более канцерогенны, чем сам металл. Соединения ртути вызывают нарушения психики и интеллекта, зрения, слуха, тремор кистей рук, век, губ и всего тела. Кроме того, ртуть может способствовать изменению состава крови, вызывая гемолиз эритроцитов, нарушения кроветворения и анемию с тяжелым течением [27]. Серебро по токсичности сравнимо со свинцом, кобальтом, мышьяком, цианидами и другими общепризнанными ядовитыми веществами. Накопление серебра в организме человека вызывает заболевание, называемое аргирия и проявляющееся в изменении цвета глаз, слизистых и кожи, которые могут приобретать цвет от серовато-голубоватого до аспидно-серого [30].

Экспериментальные результаты показывают, что ХСК обладает более высокими сорбционными характеристиками по сравнению с биомассой гриба в отношении всех исследуемых ионов тяжелых металлов. Это может быть связано с увеличением доступности и количества активных функциональных групп в структуре ХСК. В результате механохимического воздействия (предварительный размол с последующим гидролизом) на матрицу гриба при выделении ХСК происходит увеличение СЕ образцов ХСК в сравнении с биомассой гриба для ионов: никеля – в 1.6 раза меди и ртути – в 1.4 раза, серебра – в 1.2 раза.

Сравнительный анализ СЕ близких по природе растительных сорбентов показал, что ХСК гриба в целом обладает более высокой сорбционной способностью по отношению к катионам ТМ. Так, СЕ по отношению к ионам меди для хитозан-глюканового комплекса, полученного из мицелиальной биомассы гриба *Aspergillus niger*, составляет 2.2 ммоль/г [5], для биоразлагаемого целлюлозно-хитинового материала – 0.06 ммоль/г [31], для ХТ и хитозана, полученных из панциря креветки, 0.32 и 0.70 ммоль/г соответственно [32]. СЕ по отношению к ионам кобальта (никеля) для композиционного материала целлюлоза/диоксид циркония составила 0.006 (0.08) ммоль/г, а по отношению к ионам кобальта (ртути) для композита хитозан/кремнезем – 0.63 (0.47) ммоль/г [33]. СЕ по катионом ртути для ХСК, выделанных из лишайников родов *Peltigera* (*Cladonia*) составила 1.55 (0.61) ммоль/г [34].

Исследования сорбции органических красителей на поверхности ХСК гриба (табл. 3) показали, что адсорбция протекает относительно обоих красителей, что подтверждает полиамфолитную природу комплексов за счет наличия анионо- и катионообменных групп в структуре ХСК. Биомасса плодового тела гриба обладает более низкой сорбционной способностью, чем ХСК как по отношению к МС, так и к КК. Предельная СЕ биомассы гриба составляет 0.59 (МС) и 0.23 (КК) ммоль/г, при этом предельная СЕ ХСК выше в 1.8–1.9 раз по сравнению с исходной биомассой и достигает 1.09 и 0.45 ммоль/г по отношению к МС и КК, что вероятно связано с глубокой разработкой структуры поверхности сорбента в ходе выделения ХСК и увеличением доступности его функциональных групп для сорбата.

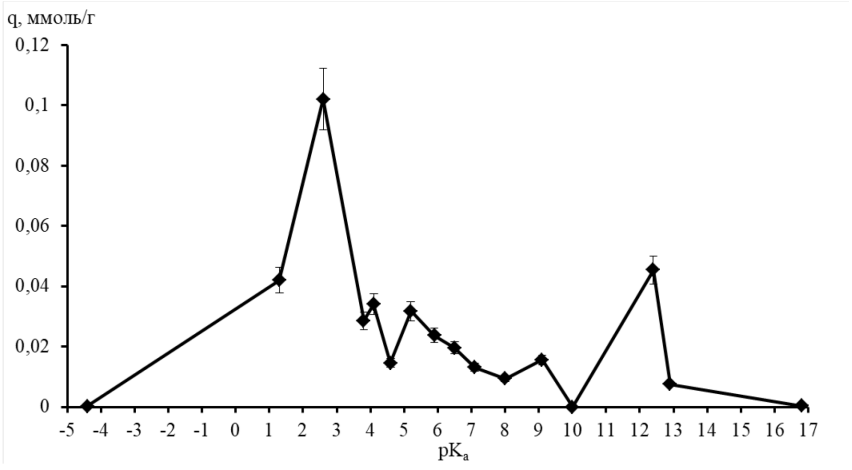


Рис. 2. Распределение центров адсорбции на поверхности ХСК гриба

Таблица 3. СЕ биомассы гриба и ХСК по отношению к ряду ионов ТМ и органических красителей

Образец	СЕ, ммоль·г$^{-1}$						
	Cu^{2+}	Co^{2+}	Ni^{2+}	Hg^{2+}	Ag^{+}	МС	КК
Плодовое тело	3.23±0.13	3.69±0.15	0.66±0.03	0.67±0.04	1.44±0.08	0.59±0.03	0.23±0.01
ХСК	4.52±0.25	3.76±0.20	1.03±0.06	0.96±0.05	1.75±0.10	1.09±0.05	0.45±0.03

При оценке биологической активности ХСК гриба по отношению к *E. coli* в трех сериях эксперимента показано, что через 24 часа инкубирования в контрольной пробирке с физиологическим раствором без добавления образцов ХСК произошло увеличение концентрации микроорганизмов в 2 раза (примерно до 300 млн. кл./мл – по шкале мутности 1 Ед.). В контрольной пробирке с пептонной водой произошло увеличение концентрации микроорганизмов в 3 раза – по шкале мутности 2 Ед. (до 600 млн. кл./мл). В остальных пробирках при добавлении от 10 до 50 мг образца ХСК наблюдалось уменьшение концентрации микроорганизмов до 3 раз (около 30 млн кл./мл – по шкале мутности 0.2 Ед.). В чашках Петри со средой Эндо происходящие изменения возможно было оценить только качественно. Установлено, что во всех чашках наблюдается рост бактерий, что свидетельствует об отсутствии бактерицидных свойств испытуемого образца. Однако некоторое отсутствие зон роста микроорганизмов вокруг образцов могут свидетельствовать об адсорбирующей способности ХСК.

Количественная оценка антибактериальных свойств ХСК свидетельствует о наличии сорбирующей способности по отношению к бактериям: в контрольных пробирках отмечено 84.0 млн кл./мл, тогда как в пробирках с ХСК (50 мг) наблюдается уменьшение содержания микроорганизмов в 2.7 раза (30.8 млн кл./мл), а при содержании ХСК 30 мг – в 1.5 раза (55.5 млн кл./мл), что свидетельствует как о его сорбирующей способности, так и бактериостатических свойствах.

Выводы

Методом кислотно-щелочного гидролиза получен хитинсодержащий комплекс из биомассы плодового тела трутового гриба вида *F. fomentarius* с выходом 18.5%, содержащий 22% ХТ, 55.0% других полисахаридов (в частности, глюкан, целлюлоза, гемицеллюлозы), 22.5% полифенолов и 0.45% белковых веществ. С применением комплекса физико-химических методов анализа (элементный анализ, ИК-спектроскопия) установлено, что полученный биополимерный хитинсодержащий комплекс гриба содержит хитин, близкий по функциональному составу к хитину из панцирей креветок *P. borealis*.

Показано, что в деионизированном водном растворе на поверхности хитинсодержащего комплекса образуются как кислотные (pK_a = 2.6; 4.1 и 5.2), так и основные (область pK_a = 9.1 и 12.4) центры связывания.

Исследованы сорбционные свойства хитинсодержащего комплекса гриба по отношению к среднемолекулярным токсикантам (красители метиленовый синий и конго красный) и ионам тяжелых металлов (Cu^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Hg^{2+}, Ag^{+}). Показано, что полученный хитинсодержащий комплекс обладает большей сорбционной способностью по отношению к исследуемым сорбатам по сравнению с исходной биомассой гриба. Наибольшая сорбционная емкость для хитинсодержащего комплекса показана относительно ионов меди (4.52±0.25 ммоль/г) и кобальта (3.76±0.20 ммоль/г). Установлено, что хитинсодержащий комплекс гриба сорбирует на своей поверхности как катионный, так и анионный красители: сорбционная емкость по метиленовому синему составила 1.09±0.05, а конго красному – 0.45±0.03 ммоль/г, что свидетельствует о полиамфолитной природе комплекса за счет наличия анионо- и катионообменных групп в структуре материала и подтверждается исследованиями распределения центров адсорбции на его поверхности.

Показано, что хитинсодержащий комплекс гриба обладает бактериостатическими и адсорбционными свойствами по отношению к грамотрицательному штамму бактерий *Escherichia coli* 4912/41. Количественная оценка воздействия хитинсодержащего комплекса на культуры бактерий показала, что в сравнении с контролем (84.0 млн кл./мл) при добавлении хитинсодержащего комплекса массой 50 мг наблюдается уменьшение концентрации колоний в 2.7 раз (до 30.8 млн кл./мл), а при массе 30 мг – в 1.5 раза (до 55.5 млн кл./мл).

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

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 предоставите соответствующие ссылки на автора(ов), источник и Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Пименов Н.В., Мирзаев М.Н., Смирнова Е.А., Иванникова Р.Ф., Заболоцкая Т.В. Биотехнология получения биологически активных веществ: Учебник для студентов факультета биотехнологии и экологии. М., 2024. 264 с.
2. Вёрткин А.Л., Кнорринг Г.Ю. Опыт и перспективы использования комбинированных энтеросорбентов в клинической медицине // Доктор.Ру. 2025. Т. 24, №8. С. 86–94. https://doi.org/10.31550/1727-2378-T(G)18.25_OF.
3. Colovic R., Puvaca N., Cheli F., Avantaggiato G., Greco D., Đuragic O., Kos J., Pinotti L. Decontamination of Mycotoxin-Contaminated Feedstuffs and Compound Feed // Toxins. 2019. Vol. 11. 617. https://doi.org/10.3390/toxins11110617.
4. Варламов В.П., Ильина А.В., Шагдарова Б.Ц., Луньков А.П., Мысякина И.С. Хитин/хитозан и его производные: фундаментальные и прикладные аспекты // Успехи биологической химии. 2020. Т. 60. С. 317–368.
5. Новинюк Л.В., Велинзон П.З., Кулев Д.Х. Сорбционные свойства хитин- и хитозан-глюкановых биокомплексов, выделенных из мицелиальной биомассы гриба *Aspergillus niger* // Известия вузов. прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7, №2. С. 64–71. https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-64-71.
6. Nawawi W.M.F.B.W., Jones M., Murphy R.J., Lee K.-Y., Kontturi E., Bismarck A. Nanomaterials derived from fungal sources – is it the new hype? // Biomacromolecules. 2020. Vol. 21. Pp. 30–55. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b01141.
7. Маркова М.Е., Урьяш В.Ф., Степанова Е.А., Груздева А.Е., Гришатова Н.В., Демарин В.Т., Туманова А.Н. Сорбция тяжелых металлов высшими грибами и хитином разного происхождения в опытах *in vitro* // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2008. №6. С. 118–124.
8. Смотрина Т.В., Киселева Л.А. Изменение структуры хитин-глюкановых комплексов грибов в результате сорбции ионов меди (II) // Бутлеровские сообщения. 2013. Т. 34, №4. С. 135–139.
9. Шибека Л.А., Мытько Д.В. Получение целлюлозосодержащих сорбционных материалов для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, №5. С. 102–107. https://doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.5.018.
10. Кадникова И.А., Гурулёва О.Н. Химический состав черного древесного гриба *Auricularia auricula-juda* // Пиво и напитки. 2015. №5. С. 66–70.
11. Brovko O.S., Ivakhnov A.D., Zhiltsov D.V., Boitsova T.A. Extraction of chitin-containing complexes from the Fomes fomentarius fungus fruiting body by the sub- and supercritical fluid extraction methods // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2023. Vol. 17, no. 7. Pp. 97–103. https://doi.org/10.1134/S199079312307014X.
12. ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности. М., 2006. 4 с.
13. ГОСТ 10847-74. Зерно. Методы определения зольности. М., 2001. 4 с.
14. Оболенская А.В. Ельницкая З.П., Леонович А.Л. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М., 1991. 320 с.
15. Евстигнеев Э.И. Определение полисахаридов в растительном сырье и препаратах лигнина // Химия растительного сырья. 2016. №2. С. 5–11. https://doi.org/10.14258/jcprm.2016021179.
16. Ившина Т.Н., Артамонова С.Д., Ившин В.П. Шарнина Ф.Ф. Выделение хитин-глюканового комплекса из плодовых тел шляпочных грибов // Прикладная биохимия и микробиология. 2009. Т. 45, №3. С. 348–343.
17. Государственная фармакопея Российской Федерации. XII изд. М., 2008. 704 с.
18. Костина А.М., Бабицкая В.Г., Лобанок А.Г. Хитин мицелиальных грибов рода *Penicillium* // Прикладная биохимия и микробиология. 1978. Т. 14, №4. С. 586–593.
19. Пахнутова Е.А. Кислотно-основные свойства поверхности газохроматографических сорбентов с привитыми слоями хелатов металлов // Журнал физической химии. 2014. Т. 88, №7-8. С. 1228–1232. https://doi.org/10.7868/S0044453714080226.
20. Пршибил Р. Комплексоны в химическом анализе: пер. с чеш. М., 1955. 188 с.
21. Бровко О.С. Ивахнов А.Д., Жильцов Д.В., Богданов М.В. *Streptomyces avermitilis*: компонентный состав, свойства // Химия растительного сырья. 2020. №1. С. 57–66. https://doi.org/10.14258/jcprm.2020015500.
22. Vukojević V., Djurdjić S., Švorc Ľ., Veličković T.Ć., Mutić J., Stanković D.M. Analytical approach for detection of ergosterol in mushrooms based on modification free electrochemical sensor in organic solvents // Food Analytical Methods. 2018. Vol. 11. Pp. 2590–2596. https://doi.org/10.1007/s12161-018-1249-3.
23. Mbonyiryivuze A., Mwakikunga B., Dhlamini S.M., Maaza M. Fourier transform infrared spectroscopy for sepia Melanin // Materials, Chemistry and Physics. 2015. Vol. 3, no. 2. Pp. 25–29. https://doi.org/10.12691/pmc-3-2-2.

24. Воробьев Д.В., Мейчик Н.Р., Лобакова Е.С., Ермаков И.П., Матвеева Н.П. Ионообменные свойства клеточных стенок, изолированных из таллома лишайника *Peltigera aphthosa* (L.) Willd. // Микробиология. 2009. Т. 78, №5. С. 702–708.
25. Исаева В.А., Шарнин В.А. Энтальпии кислотно-основных равновесий в водно-этанольных растворах аминокислот и пептидов: расчет и эксперимент // Журнал физической химии. 2022. Т. 96, №4. С. 495–501. https://doi.org/10.31857/S0044453722040112.
26. Альберт А. Константы ионизации кислот и оснований. Л., 1964. 140 с.
27. Илларионова Е.А. Химико-токсикологический анализ тяжелых металлов. Иркутск, 2022. 63 с.
28. Доломатов С.И., Сатаева Т.П., Жуков В. Современные аспекты регуляторных, патофизиологических и токсических эффектов, вызываемых ионами кобальта при оральном поступлении в организм человека // Анализ риска здоровью. 2019. №3. С. 161–174. https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.3.19.
29. Сутункова М.П. Оценка токсического действия наночастиц NiO при ингаляционном поступлении // Медицина труда и промышленная экология. 2019. №59 (2). С. 86–91. https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-2-86-91.
30. Islam M.S., Larimer C., Ojha A.l., Nettleship I. Antimycobacterial efficacy of silver nanoparticles as deposited on porous membrane filters // Materials Science and Engineering. 2013. Vol. 33. Pp. 4575–4581. https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.07.013.
31. Zhou D., Wang H., Guo S. Preparation of cellulose/chitin blend materials and influence of their properties on sorption of heavy metals // Sustainability. 2021. Vol. 13. 6460.
32. Sofiane B., Slimane K.S. Biosorption of heavy metals by chitin and the chitosan // Der Pharma Chemica. 2015. Vol. 5. Pp. 54–63.
33. Яркулов А.Ю., Сагдуллаев Б.У., Сманова З.А., Акбаров Х.И. Адсорбция ионов тяжелых металлов гибридными нанокомпозиционными материалами диацетатцеллюлоза-кремнезем // Юниверсум: Химия и биология. 2020. №3 (69). С. 1–6.
34. Жильцов Д.В., Бровко О.С., Ивахнов А.Д., Боголицын К.Г., Бойцова Т.А., Паламарчук И.А. Сорбционные свойства хитинсодержащих комплексов, выделенных из талломов лишайников методом сверхкритической флюидной экстракции // Успехи современного естествознания. 2018. №11-2. С. 210–215.

Поступила в редакцию 18 июня 2025 г.

После переработки 30 октября 2025 г.

Принята к публикации 17 сентября 2026 г.

Brovko O.S.[*]*, Zhiltsov D.V., Boitsova T.A.* STRUCTURAL FEATURES AND SORPTION PROPERTIES OF CHITIN-CONTAINING MATERIALS FROM WOOD-DESTRUCTING FUNGUS OF THE SPECIES *FOMES FOMENTARIUS*

Federal Center for Integrated Arctic Research named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ave. Nikolsky, 20, Arkhangelsk, 163020, Russia, dnorton.usa@gmail.com

This article focuses on investigating the properties of a chitin-containing complex derived from the wood-decaying fungus *Fomes fomentarius* via acid-alkali hydrolysis. The objective of the study was to isolate this chitin-containing complex from the biomass of *Fomes fomentarius* fruiting bodies and to examine its chemical structure and sorption properties. A chitin-containing complex from the biomass of the fruiting body of the fungus *F. fomentarius* was obtained by acid-base hydrolysis. It contains 22% chitin, 55% other polysaccharides, 22.9% polyphenols, and less than 0.5% protein. Elemental analysis and IR spectroscopy methods showed that the obtained biopolymer complex of the fungus contains chitin similar in its functional composition to crab chitin. It was shown that both acidic (pK_a = 2.6, 4.1, and 5.2) and basic (pK_a = 9.1 and 12.4) binding sites are present on the surface of the chitin-containing complex in aqueous solutions. It was found that the chitin-containing complex has a high adsorption capacity (mmol/g) with respect to a number of heavy metal cations, including copper (4.52), cobalt (3.76), silver (1.75), mercury (0.96), and nickel (1.03). The chitin-containing complex of the fungus sorbs both cationic and anionic dyes on its surface. The sorption capacity for methylene blue was 1.09 mmol/g, and for Congo red was 0.45 mmol/g. The acid-base properties of the surface and the ability of the chitin-containing complex to sorb differently charged compounds indicate its polyampholytic nature. It was found that the chitin-containing complex of the fungus has bacteriostatic and adsorption properties in relation to the strain of the gram-negative bacterium *Escherichia coli*. When adding the sample of the chitin-containing complex from 10 to 50 mg to test tubes with physiological solution and peptone water, a decrease in the concentration of microorganisms by up to 3 times was observed.

Keywords: chitin-containing complex, wood-destroying fungus, acid-base properties of the surface, heavy metals, methylene blue, congo red.

For citing: Brovko O.S., Zhiltsov D.V., Boitsova T.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 4, Online First. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20260417484.

[*] Corresponding author.

References

1. Pimenov N.V., Mirzayev M.N., Smirnova Ye.A., Ivannikova R.F., Zabolotskaya T.V. *Biotekhnologiya polucheniya biologicheski aktivnykh veshchestv: Uchebnik dlya studentov fakul'teta biotekhnologii i ekologii*. [Biotechnology for the Production of Biologically Active Substances: A Textbook for Students of the Faculty of Biotechnology and Ecology]. Moscow, 2024, 264 p. (in Russ.).
2. Vortkin A.L., Knorring G.Yu. *Doktor.Ru*, 2025, vol. 24, no. 8, pp. 86–94. https://doi.org/10.31550/1727-2378-T(G)18.25_OF. (in Russ.).
3. Colovic R., Puvaca N., Cheli F., Avantaggiato G., Greco D., Đuragic O., Kos J., Pinotti L. *Toxins*, 2019, vol. 11, 617. https://doi.org/10.3390/toxins11110617.
4. Varlamov V.P., Il'ina A.V., Shagdarova B.Ts., Lun'kov A.P., Mysyakina I.S. *Uspekhi biologicheskoy khimii*, 2020, vol. 60, pp. 317–368. (in Russ.).
5. Novinyuk L.V., Velinzon P.Z., Kulev D.Kh. *Izvestiya vuzov. prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 64–71. https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-64-71. (in Russ.).
6. Nawawi W.M.F.B.W., Jones M., Murphy R.J., Lee K.-Y., Kontturi E., Bismarck A. *Biomacromolecules*, 2020, vol. 21, pp. 30–55. https://doi.org/10.1021/acs.biomac.9b01141.
7. Markova M.Ye., Ur'yash V.F., Stepanova Ye.A., Gruzdeva A.Ye., Grishatova N.V., Demarin V.T., Tumanova A.N. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2008, no. 6, pp. 118–124. (in Russ.).
8. Smotrina T.V., Kiseleva L.A. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2013, vol. 34, no. 4, pp. 135–139. (in Russ.).
9. Shibeka L.A., Myt'ko D.V. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*, 2023, vol. 14, no. 5, pp. 102–107. https://doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.5.018. (in Russ.).
10. Kadnikova I.A., Gurulova O.N. *Pivo i napitki*, 2015, no. 5, pp. 66–70. (in Russ.).
11. Brovko O.S., Ivakhnov A.D., Zhiltsov D.V., Boitsova T.A. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2023, vol. 17, no. 7, pp. 97–103. https://doi.org/10.1134/S199079312307014X.
12. *GOST 16483.7-71. Drevesina. Metody opredeleniya vlazhnosti*. [GOST 16483.7-71. Wood. Methods for determination of moisture content]. Moscow, 2006, 4 p. (in Russ.).
13. *GOST 10847-74. Zerno. Metody opredeleniya zol'nosti*. [GOST 10847-74. Grain. Methods for determination of ash content]. Moscow, 2001, 4 p. (in Russ.).
14. Obolenskaya A.V. Yel'nitskaya Z.P., Leonovich A.L. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy*. [Laboratory Exercises in the Chemistry of Wood and Cellulose]. Moscow, 1991, 320 p. (in Russ.).
15. Yevstigneyev E.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2016, no. 2, pp. 5–11. https://doi.org/10.14258/jcprm.2016021179. (in Russ.).
16. Ivshina T.N., Artamonova S.D., Ivshin V.P. Sharnina F.F. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 348–343. (in Russ.).
17. *Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii. XII izd*. [State Pharmacopoeia of the Russian Federation. 12th ed.]. Moscow, 2008, 704 p. (in Russ.).
18. Kostina A.M., Babitskaya V.G., Lobanok A.G. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 1978, vol. 14, no. 4, pp. 586–593. (in Russ.).
19. Pakhnutova Ye.A. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2014, vol. 88, no. 7-8, pp. 1228–1232. https://doi.org/10.7868/S0044453714080226. (in Russ.).
20. Prshibil R. *Kompleksony v khimicheskom analize: per. s chesh*. [Complexones in Chemical Analysis: translated from Czech]. Moscow, 1955, 188 p. (in Russ.).
21. Brovko O.S. Ivakhnov A.D., Zhil'tsov D.V., Bogdanov M.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 1, pp. 57–66. https://doi.org/10.14258/jcprm.2020015500. (in Russ.).
22. Vukojević V., Djurdjić S., Švorc Ľ., Veličković T.Ć., Mutić J., Stanković D.M. *Food Analytical Methods*, 2018, vol. 11, pp. 2590–2596. https://doi.org/10.1007/s12161-018-1249-3.
23. Mbonyiryivuze A., Mwakikunga B., Dhlamini S.M., Maaza M. *Materials, Chemistry and Physics,* 2015, vol. 3, no. 2, pp. 25–29. https://doi.org/10.12691/pmc-3-2-2.
24. Vorob'yev D.V., Meychik N.R., Lobakova Ye.S., Yermakov I.P., Matveyeva N.P. *Mikrobiologiya*, 2009, vol. 78, no. 5, pp. 702–708. (in Russ.).
25. Isayeva V.A., Sharnin V.A. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2022, vol. 96, no. 4, pp. 495–501. https://doi.org/10.31857/S0044453722040112. (in Russ.).
26. Al'bert A. *Konstanty ionizatsii kislot i osnovaniy*. [Ionization Constants of Acids and Bases]. Leningrad, 1964, 140 p. (in Russ.).
27. Illarionova Ye.A. *Khimiko-toksikologicheskiy analiz tyazhelykh metallov*. [Chemical-toxicological analysis of heavy metals]. Irkutsk, 2022, 63 p. (in Russ.).
28. Dolomatov S.I., Satayeva T.P., Zhukov V. *Analiz riska zdorov'yu*, 2019, no. 3, pp. 161–174. https://doi.org/10.21668/health.risk/2019.3.19. (in Russ.).
29. Sutunkova M.P. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2019, no. 59 (2), pp. 86–91. https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-2-86-91. (in Russ.).
30. Islam M.S., Larimer C., Ojha A.l., Nettleship I. *Materials Science and Engineering*, 2013, vol. 33, pp. 4575–4581. https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.07.013.
31. Zhou D., Wang H., Guo S. *Sustainability*, 2021, vol. 13, 6460.

32. Sofiane B., Slimane K.S. *Der Pharma Chemica*, 2015, vol. 5, pp. 54–63.
33. Yarkulov A.Yu., Sagdullayev B.U., Smanova Z.A., Akbarov Kh.I. *Yuniversum: Khimiya i biologiya*, 2020, no. 3 (69), pp. 1–6. (in Russ.).
34. Zhil'tsov D.V., Brovko O.S., Ivakhnov A.D., Bogolitsyn K.G., Boytsova T.A., Palamarchuk I.A. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2018, no. 11-2, pp. 210–215. (in Russ.).

Received June 18, 2025

Revised October 30, 2025

Accepted September 17, 2026

Сведения об авторах

Бровко Ольга Степановна – кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, brovko-olga@rambler.ru

Жильцов Дмитрий Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, dnorton.usa@gmail.com

Бойцова Татьяна Александровна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории химии растительных биополимеров, tboitsova@yandex.ru

Information about authors

Brovko Olga Stepanovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Plant Biopolymer Chemistry, brovko-olga@rambler.ru

Zhiltsov Dmitry Vladimirovich – Junior Researcher at the Laboratory of Plant Biopolymer Chemistry, dnorton.usa@gmail.com

Boytsova Tatyana Alexandrovna – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Plant Biopolymer Chemistry, tboitsova@yandex.ru