

Научная статья

УДК 663.974.5.05(06)

DOI 10.46845/1997-3071-2024-74-25-34

Перспективы применения сорбента на основе коллагенового волокна из гидробионтов

Алеся Сергеевна Каньшина¹, Ольга Александровна Белых²

^{1, 2} Калининградский государственный технический университет, Калининград,
Россия

²olga.belykh@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7274-1420>

Аннотация. Статья посвящена вопросу изучения перспектив применения в качестве сорбента биоразлагаемого коллагенового волокна. Вторичная переработка рыбьей чешуи выполнена на кафедре химии Калининградского государственного технического университета экономически доступным способом. Чешую отмывали водой с добавлением NaCl и Na₂CO₃ при нагревании. Центрифугирование при 2347 RCF, сушка и отсев на ситах позволили получить коллагеновое волокно разных фракций. Описан процесс получения коллагенового фильтра, указаны его характеристики. Приведены результаты полевого эксперимента по фильтрации воды из городского водотока Калининграда исследуемым сорбционным фильтром. Проведен сравнительный анализ органолептических и физико-химических показателей исследуемого образца воды до и после фильтрации. Адсорбционная способность оценивалась по нескольким параметрам. Анализ фильтрата показал, что происходит осаждение ионов Na⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻; биогенных элементов в молекулярном и ионном виде SiO₂, NH₄⁺, NO₃⁻, снижается общая минерализация более чем в 3 раза. Значительно улучшились органолептические показатели отфильтрованной воды – прозрачность, цвет и запах. Полученные данные приведены в сравнении с водной средой, взятой из водотока г. Калининграда. Выявлены селективные свойства коллагенового фильтра. Показано, что использование коллагенового волокна эффективно для очистки водных сред и может быть рекомендовано для создания биоразлагаемых фильтров жидких фракций. Методологическим успехом является обоснование возможности использования природного вторичного сырья для снижения экологических проблем хранения и переработки фибриллярных белков чешуи гидробионтов.

Ключевые слова: биоразлагаемое волокно, чешуя гидробионтов, фильтрующий элемент, сорбент, очистка воды.

Для цитирования: Каньшина А. С., Белых О. А. Перспективы применения сорбента на основе коллагенового волокна из гидробионтов // Известия КГТУ. 2024. № 74. С. 25–34. DOI 10.46845/1997-3071-2024-74-25-34.

Original article

Prospects for the use of sorbent based on collagen fiber from hydrobionts

Alesya S. Kan'shina¹, Ol'ga A. Belykh²

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

²olga.belykh@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7274-1420>

Annotation. The article is devoted to the study of the prospects for using biodegradable collagen fiber as a sorbent. Recycling of fish scales has been carried out at the Department of Chemistry of Kaliningrad State Technical University, in an economically accessible way. The scales were washed with water with the addition of NaCl and Na₂CO₃ while heating. Centrifugation at 2347 RCF, drying and screening on sieves made it possible to obtain new collagen fiber of different fractions. The process of obtaining a collagen filter is described and its characteristics are indicated. The results of a field experiment on the filtration of water from an urban watercourse in Kaliningrad using the sorption filter under study are presented. A comparative analysis of the organoleptic and physicochemical parameters of the studied water sample before and after filtration has been carried out. Adsorption capacity has been assessed using several parameters. Analysis of the filtrate showed that precipitation of ions occurs Na⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻; biogenic elements in molecular and ionic form SiO₂, NH₄⁺, NO₃⁻, total mineralization decreases by more than 3 times. The organoleptic characteristics of filtered water have significantly improved: transparency, color and smell. The obtained data are presented in comparison with the aquatic environment taken from the Kaliningrad watercourse. The selective properties of the collagen filter have been revealed. It has been shown that the use of collagen fiber is effective for purifying aqueous media and can be recommended for creating biodegradable filters for liquid fractions. A methodological success is the substantiation of the possibility of using natural secondary raw materials to reduce the environmental problems of storing and processing fibrillar proteins of hydrobiont scales.

Key words: biodegradable fiber, scales of hydrobionts, filter element, sorbent, water purification.

For citation: Kanshina A. S., Belykh O. A. Prospects for the use of a sorbent based on collagen fiber from hydrobionts // *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2024; (74):25–34. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2024-74-25-34.

ВВЕДЕНИЕ

В современных производственных вызовах актуальность набирают исследования в области защиты окружающей среды путем утилизации промышленных отходов, а также их вторичная переработка [1]. Рост численности крупных предприятий и сосредоточение на них все большей части имеющихся в обществе средств производства сопровождается образованием значительного количества отходов. Развитие рыбоперерабатывающей деятельности указывает на увеличение потенциала образования жидких отходов. Для того чтобы рыбоперерабатывающая

промышленность в Калининградской области всегда была устойчивой и работала по принципу нулевых отходов, необходима структурированная информация.

Разнообразные химические вещества, применяемые в современном производстве, представляют серьезную экологическую угрозу. Нарастание производственных процессов спровоцировало изменение химического состава поверхностных вод, что привело к поиску и разработке новых методов очистки и сорбционных материалов. В водотоки частично попадают отходы рыбообработки, ремонта судов, строительной отрасли и др. Актуальным является анализ химического состава поверхностных вод, который определяет оптимальный подбор применения реагентов – коагулянтов и флокулянтов для их очистки [2]. В отработанной воде, возвращаемой после очистки с предприятий, все еще могут содержаться разнообразные загрязняющие вещества. В зависимости от используемых на производстве реагентов эти вещества могут быть как в растворенном, так и во взвешенном состоянии [3, 4]. Планирование очистных мероприятий требует индивидуального подхода, необходимо учитывать источники происхождения загрязнителей, природно-климатические особенности регионов, направленность производства предприятий, режим притока промышленных вод не только суточный, но и сезонный.

Водотоки Калининградской области содержат различные загрязнители – нерастворенные вещества (песок, глина, шлам, вызывающие мутность воды), растворенные (минеральные соли, пестициды, химические соединения и другие, влияющие на качество воды), биологические загрязнители (водоросли, бактерии и другие микроорганизмы), тяжелые металлы и прочие токсичные вещества (свинец, ртуть, кадмий и другие, вредные для окружающей среды и здоровья) [5].

Рыбные отходы частично используются для производства удобрений и рыбьего жира с низкой рентабельностью или как сырье для непосредственного скармливания в аквакультуре, некоторая часть отходов выбрасывается. Для решения экологических проблем и полного использования биомассы в целях получения высокой коммерческой ценности рыбные отходы исследовались как потенциальный ресурс для производства продуктов с добавленной стоимостью (т. е. белков, пептидов, коллагена, ферментов и масел). В последнее время отходы привлекают особое внимание в качестве источника хитина и производных с особым упором на рыбью чешую [6, 7]. Рыбья чешуя – уникальный природный биоматериал, состоящий в основном из коллагена I типа и гидроксиапатита. Высокоупорядоченная иерархическая микроструктура и состав чешуи обуславливают хорошую способность к разложению и превосходные механические свойства для потенциального применения, в том числе в тканевой инженерии, биологическом наполнении, переработке сточных вод и гибкой электронике [8]. Однако практическое использование чешуи ограничено из-за отсутствия коммерческой ценности, что приводит к загрязнению окружающей среды биологическими отходами. В данном контексте особенно важны переработка и повторное использование рыбьей чешуи. Чешуя состоит в основном из плотно упакованных коллагеновых волокон диаметром от 70 до 80 нм, окруженных гидроксиапатитом и другими соединениями кальция, которые могут обладать определенными адсорбционными свойствами. Недавние исследования показали, что некоторые виды чешуи могут действовать как недорогие и экологически чистые биосорбенты для удаления тяжелых металлов и красителей из растворов [9, 10].

Рыбья чешуя является наименее востребованным отходом, объем которого в зависимости от вида рыб колеблется 0,5 % до 10 % сырья, вовлекаемого во вторичную переработку. Статистические данные указывают, что в 2023 г. на океаническом промысле добывалось 240–260 тыс. т рыбы. В прибрежной части Балтийского моря и его заливах вылов рыбы составляет 25–28 тыс. т [4]. Если сопоставить эти объемы с количеством образуемой при обработке чешуи, то это составит примерно 16,5 т. Данную массу отходов можно эффективно перерабатывать.

В мировой литературе неоднократно зафиксированы случаи применения рыбьей чешуи для очистки природных и сточных вод от ионов металлов. Есть ряд публикаций, посвященных удалению органических соединений из водных растворов волокнами полученными из чешуи рыб [11]. В Калининградской области уже известно применение коллагенового волокна (КВ) в качестве фильтра для сигарет [12] и в рецептурах маршмеллоу [13]. Исследование применения КВ из гидробионтов в виде фильтрата для воды является лишь небольшой частью перспективных направлений использования этого ценного биоразлагаемого материала. Также можно спроецировать применение рыбьей чешуи в фильтрах для пылесосов (данные комплектующие из КВ будут экономически доступнее для потребителя), в качестве фильтров для кофе (что сейчас очень актуально из-за популярности кофемашин), воздушных фильтров для дополнительной очистки атмосферы городов.

В настоящем исследовании рыбья чешуя, переработанная до состояния коллагенсодержащего волокна [14], используется в качестве фильтра для очистки воды от поллютантов (катионов и анионов), биогенных элементов. Цель работы – проанализировать возможность применения КВ из чешуи в качестве биоразлагаемого компонента – фильтра (сорбента) для воды.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рабочая гипотеза эксперимента состоит в том, что КВ хорошо проницаемо для жидкостей и будет химически взаимодействовать во всем объеме с заряженными частицами и что удерживающие силы достаточно велики. Макромолекулы взаимодействуют между собой за счет сил Ван-Дер-Ваальса, образуя цепочки из агрегатов на сорбенте. Это явление наблюдается при течении гелеобразных растворов. Макромолекулы КВ находятся в фибриллярном состоянии, и такая конструкция способствует лучшей адсорбции электролитов. Электростатический фактор устойчивости присущ водным средам, создающим условия для диссоциации (поверхностная диссоциация вещества, адсорбция электролитов и ионогенных поверхностно активных веществ).

В качестве опытного образца фильтрующего сорбента было использовано коллагенсодержащее волокно, полученное из чешуи судака в лабораторных условиях на кафедре химии КГТУ [14]. Оно имеет разную степень измельчения. В данной ситуации считаем целесообразным выбрать смесь короткого волокна «ваты» с размером фракции 0,1–2,5 мм. Для фильтрации использовалась фильтровальная бумага диаметром 90 мм, марки ФС, средней фильтрации, сложенная в виде конуса по размеру лабораторной воронки. В нее поместили коллагенсодержащее волокно слоем 3–4 см. Далее проводилась фильтрация воды стандартным способом.

Для эксперимента использовали образец воды из р. Преголи возле Старого порта (г. Калининград, Правая набережная, 21). Место отбора выбрано вблизи действующих Морского рыбного и Морского торгового портов. Остаточные продукты деятельности этих объектов в виде катионов, анионов и других химических элементов представляют интерес в данном исследовании. Внешний вид опытного образца фильтра показан на рис. 1.

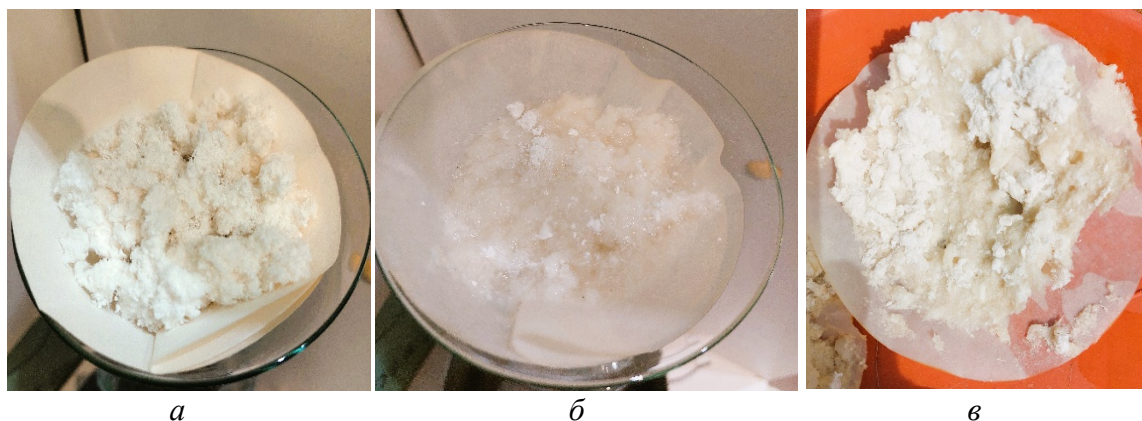


Рис. 1. Внешний вид опытного образца фильтра: а) до начала фильтрования; б) в процессе фильтрации; в) по окончании процесса на стадии сушки
Fig. 1. Appearance of a prototype filter: a) before filtration begins; b) during the filtration process; c) at the end of the process at the drying stage

Необходимо отметить, что коллагенсодержащее волокно при намокании значительно уменьшается в объеме (рис. 2б), для достижения большей степени очистки его нужно уплотнять, периодически добавляя адсорбент при усадке на фильтр. Результаты фильтрования приведены в табл. 1 и 2.

По химическому составу рыба чешуя образована фибриллярными белками, или коллагенами. Волокна коллагена представлены нитевидной структурой с плотностью $1,33 \text{ г/см}^3$. Вторым компонентом термогидролиза чешуи является гидроксиапатит кальция, который составляет основу костного скелета пластинки. Биоминерал находится в виде порошка с плотностью $3,12 \text{ г/см}^3$ [15]. Такая структура позволяет задерживать растворенные в воде заряженные частицы и биогенные элементы, попавшие в водоем из-за бытовых и промышленных выбросов.

По результатам табл. 1 и 2 видно, насколько эффективно применение адсорбента на основе рыбной чешуи в качестве фильтрата – количество ионов натрия и хлорид-ионов сократилось почти в 2 раза, содержание гидрокарбонатов уменьшилось на 0,06 г. Лучший эффект был достигнут при фильтрации биогенных элементов – количество кремния снизилось примерно в 2 раза, ионов аммония – в 15 раз, нитратов стало меньше в 42 раза. Биогенные элементы являются ключевыми компонентами для поддержания жизни и поставляются организмам из окружающей среды через пищу, воду и воздух.

Таблица 1. Органолептические показатели пробы воды до и после фильтрования
Table 1. Organoleptic characteristics of water samples before and after filtration

Показатель, единица измерения	Результаты испытаний	
	до	после
Запах, балл	4	3
Цветность, градус	86	70
Мутность, ЕМФ	27	21

Таблица 2. Физико-химический состав пробы воды до и после фильтрования
Table 2. Physicochemical composition of the water sample before and after filtration

Показатель	Массовая концентрация показателей, мг/дм ³	
	до	после
Катионы и анионы		
Na ⁺	136	77
SO ₄ ²⁻	46	47
Cl ⁻	123	70
HCO ₃ ⁻	299	238
Биогенные элементы		
SiO ₂	более 16,0	7,5
NH ₄ ⁺	35,0	2,3
NO ₃ ⁻	8,00	0,19
Общая минерализация	1245	455

Общая минерализация воды (рис. 2) в целом уменьшилась более чем в три раза. Эффективность адсорбции меди, мышьяка, хрома из стоков предприятий на фильтры, содержащие коллагеновые волокна, доказывают публикации ряда исследователей [16–18].

Сорбционный фильтр содержит много гидроксильных групп, что увеличивает активные центры удаления тяжелых металлов (хрома (VI), свинца, мышьяка, меди, ртути и др.). КВ продемонстрировало необходимые свойства в качестве фильтрующего сорбента, такие как высокая водопроницаемость и механическая прочность. После фильтрации оставшийся материал легко претерпевает естественный процесс разложения, что также находит подтверждение в литературе [19, 20]. КВ, используемое в экологических системах, может подвергаться механической и химической деструкции с помощью различных методов.

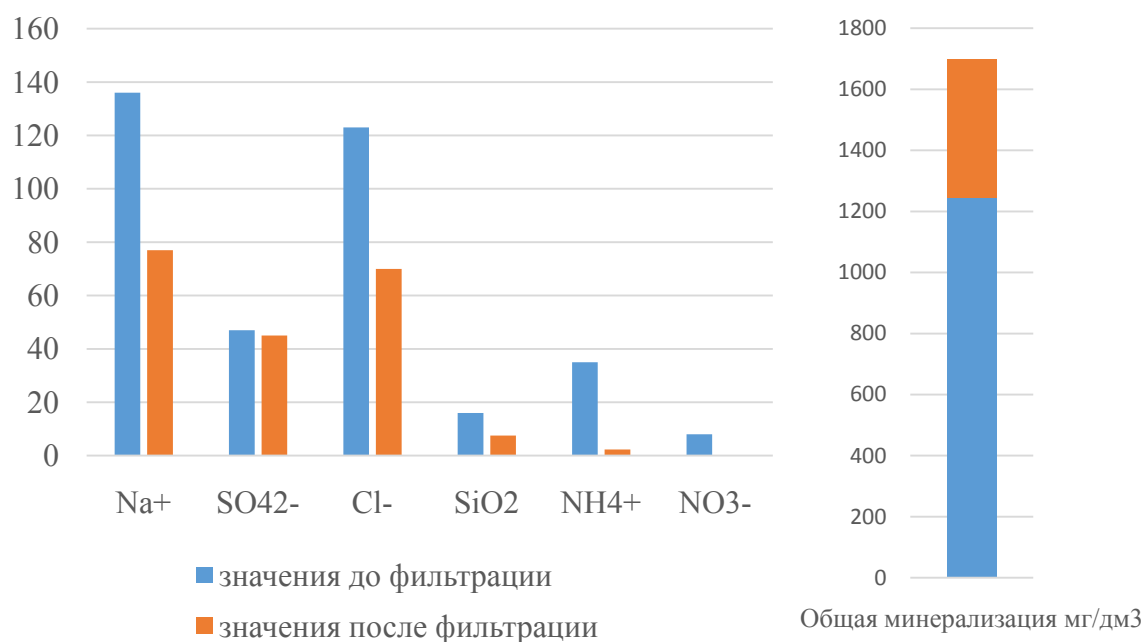


Рис. 2. Визуализация результатов испытания адсорбционной способности коллагенового волокна

Fig. 2. Visualization of the results of an experiment testing a sorbent material made from collagen fiber

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые проведено исследование адсорбционных свойств коллагенового волокна, полученного методом термического гидролиза из чешуи гидробионтов. Подтверждена возможность его применения в качестве фильтрующего сорбента водных сред. Исследование доказывает потенциал использования КВ рыбьей чешуи в качестве биоразлагаемого материала для удаления загрязняющих веществ из растворов. Результаты органолептических и физико-химических анализов обосновывают перспективность применения изученного сорбента, обеспечивающего достоверное снижение загрязняющих веществ. Техническая информация, полученная об адсорбирующих свойствах КВ, для оптимального использования должна быть расширена за счет изучения реологических свойств взвесей и растворов, планируемых для очищения.

Список источников

1. Recycling and use fibrous waste in industrial production / B. Islamov, D. Mamaeva, M. Fattakhov, S. Tashpulatov // Universum: technical sciences. 2024. N 2–8(119). P. 14–20.
2. Studies on the efficiency of fish scale adsorbents for treatment of fish processing effluent / S. S. Devasena et al. // Environmental Progress and Sustainable Energy. 2023. V. 42. N 6. DOI 10.1002/ep.14195.

3. Оценка экологической пригодности водотоков города Байкальска для развития туризма и рекреации / Л. В. Каницкая [и др.] // Фундаментальные исследования. 2015. № 7. С. 463–467.
4. Ульрих Е. В., Баркова Л. С. Параметры флокуляции сточных вод с последующим фильтрованием на пресс-фильтрах // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 53–64. DOI 10.46845/1997-3071-2022-66-53-64.
5. Государственный доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2022 году». Калининград, 2023. 174 С.
6. Малова М. Н. Рыбохозяйственный комплекс Калининградской области: настоящее и будущее // Молодой ученый. 2014. № 7. С. 55–57.
7. Wu D. Y., Wang S. S., Wu C. S. Antibacterial properties and cytocompatibility of biobased nanofibers of fish scale gelatine, modified polylactide, and freshwater clam shell // Int. J. Biol. Macromol. 2020. N 165. P. 1219–1228.
8. Fish scales as a biosorbent of pollutants from wastewaters and natural waters (a literature review) / I. G. Shaikhiev et al. // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2020. V. 10. N 6. P. 6893–6905.
9. Damian G., Varvara S. Assessment of Cyprinus carpio Scales as a Low-Cost and Effective Biosorbent for the Removal of Heavy Metals from the Acidic Mine Drainage Generated at Rosia Montana Gold Mine (Romania) // Water. 2022. V. 14. N 22. P. 3734.
10. Using modified fish scale waste from Sardinella brasiliensis as a low-cost adsorbent to remove dyes from textile effluents / G. Niero et al. // J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng. 2019. V. 54. N 11. P. 1083–1090.
11. Structure and mechanical performance of a «modern» fish scale / D. Zhu et al. // Advanced Engineering Materials. 2012. V. 14. N 4. P. B185–B194.
12. Воробьев В. И., Чернышева Н. Л., Нижникова Н. Л. Фильтр для сигарет с коллагенсодержащей добавкой из гидробионтов // Балтийский морской форум: Материалы XI Международного Балтийского морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. С. 36–41.
13. Воробьев В. И., Нижникова Н. Л., Чернега О. П. Применение коллагенсодержащей добавки из гидробионтов в рецептурах маршмеллоу // Балтийский морской форум: Материалы XI Международного Балтийского морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, 2023. С. 31–35.
14. Воробьев В. И., Нижникова Е. В. Получение фракций коллагена и гидроксиапатита из рыбьей чешуи // Известия КГТУ. 2021. №. 62. С. 80–91. DOI 10.46845/1997-3071-2021-62-80-91.
15. Comparison of the morphology, structures and mechanical properties of teleost fish scales collected from New Zealand / D. Zhu et al. // J. Bionic Eng. 2019. V. 16. N 2. P. 328–336.
16. Ahmadifar Z., Dadvand Koohi A. Characterization, preparation, and uses of nanomagnetic Fe₃O₄ impregnated onto fish scale as more efficient adsorbent for Cu (2+) ion adsorption. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2018. V. 25. N 20. P. 19687–19700.
17. Cerium supported on high porous carbon from fish scales carp, as a novel low cost adsorbent to remove As (V) ions from water / Z. S. Veličković et al. // Mater. Methods Technol. 2018. V. 12. N 1. P. 110–122.
18. Teshale F., Karthikeyan R., Sahu O. Synthesized bioadsorbent from fish scale for chromium (III) removal. 2020. V. 130. P. 102817.

19. Engineered fish scale gelatin: An alternative and suitable biomaterial for tissue engineering / A. Manikandan et al. // *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*. 2017. V. 33. N 3. P. 332–346.

20. Effect of fructose and ascorbic acid on the performance of cross-linked fish gelatin films / P. Guerrero // *Polymers (Basel)*. 2020. V. 12. N 3. P. 570.

References

1. Islamov B., Mamaeva D., Fattakhov M., Tashpulatov S. Recycling and use fibrous waste in industrial production. *Universum: technical sciences*. 2024, no. 2–8 (119), pp. 14–20.

2. Devasena S. S. [et al.]. Studies on the efficiency of fish scale adsorbents for treatment of fish processing effluent. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 2023, vol. 42, no. 6, DOI 10.1002/ep.14195.

3. Kanitskaya L. V. [i dr.]. Otsenka ekologicheskoy prigodnosti vodotokov goroda Baykal'ska dlya razvitiya turizma i rekreatsii [Assessment of the ecological suitability of the watercourses of the city of Baikal'sk for the development of tourism and recreation]. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015, no. 7, pp. 463–467.

4. Ul'rikh E. V., Barkova L. S. Parametry flokulyatsii stochnykh vod s posleduyushchim fil'trovaniem na press-fil'trakh [Parameters of wastewater flocculation followed by filtration using press filters]. *Izvestiya KGTU*, 2022, no. 66, pp. 53–64.

5. Gosudarstvennyy doklad "Ob ekologicheskoy ostanovke v Kaliningradskoy oblasti v 2022 godu" [State report "On the environmental shutdown in the Kaliningrad region in 2022"]. Kaliningrad, 2023, 174 p.

6. Malova M. N. Rybokhozyaystvennyy kompleks Kaliningradskoy oblasti: nastoyashchee i budushchee [Fisheries complex of the Kaliningrad region: present and future]. *Molodoy uchenyy*. 2014, no. 7, pp. 55–57.

7. Wu D. Y., Wang S. S., Wu C. S. Antibacterial properties and cytocompatibility of biobased nanofibers of fish scale gelatine, modified polylactide, and freshwater clam shell. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020, no. 165, pp. 1219–1228.

8. Shaikhiev I. G. [et al.]. Fish scales as a biosorbent of pollutants from wastewaters and natural waters. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2020, vol. 10, no. 6, pp. 6893–6905.

9. Damian G., Varvara S. Assessment of Cyprinus carpio Scales as a Low-Cost and Effective Biosorbent for the Removal of Heavy Metals from the Acidic Mine Drainage Generated at Rosia Montana Gold Mine (Romania). *Water*. 2022, vol. 14, no. 22, pp. 3734.

10. Niero G. [et al.]. Using modified fish scale waste from *Sardinella brasiliensis* as a low-cost adsorbent to remove dyes from textile effluents. *J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 2019, vol. 54, no. 11, pp. 1083–1090.

11. Zhu D. [et al.]. Structure and mechanical performance of a «modern» fish scale. *Advanced Engineering Materials*. 2012, vol. 14, no. 4, pp. B185–B194.

12. Vorob'ev V. I., Chernyshova N. L., Nizhnikova N. L. Fil'tr dlya sigaret s kollagensoderzhashchey dobavkoy iz gidrobiontov [Filter for cigarettes with collagen-containing additive from hydrobionts]. *Baltiyskiy morskoy forum: materialy XI Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma* [Baltic Maritime Forum: proceedings of

the XI International Baltic Maritime Forum]. Kaliningrad, BGARF FGBOU VO «KGTU» Publ., 2023, pp. 36–41.

13. Vorob'ev V. I., Nizhnikova N. L., Chernega O. P. Primenenie kollagenso-derzhashchey dobavki iz gidrobiontov v retsepturakh marshmellou [The use of collagen-containing additives from hydrobionts in marshmallow formulations]. *Baltiyskiy morskoy forum: materialy XI Mezhdunarodnogo Baltiyskogo morskogo foruma* [Baltic Maritime Forum: proceedings of the XI International Baltic Maritime Forum]. Kaliningrad, BGARF FGBOU VO «KGTU» Publ., 2023, pp. 31–35.

14. Vorob'ev V. I., Nizhnikova E. V. Poluchenie fraktsiy kollagena i gidroksiapatita iz ryb'ey cheshui [Obtaining fractions of collagen and hydroxyapatite from fish scales]. *Izvestiya KGTU*, 2021, no. 62, pp. 80–91. DOI 10.46845/1997-3071-2021-62-80-91.

15. Zhu D. [et al.]. Comparison of the morphology, structures and mechanical properties of teleost fish scales collected from New Zealand. *J. Bionic Eng.* 2019, vol. 16, no. 2, pp. 328–336.

16. Ahmadifar Z., Dadvand Koohi A. Characterization, preparation, and uses of nanomagnetic Fe₃O₄ impregnated onto fish scale as more efficient adsorbent for Cu (2+) ion adsorption. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018, vol. 25, no. 20, pp. 19687–19700.

17. Veličković Z. S. [et al.]. Cerium supported on high porous carbon from fish scales carp, as a novel low cost adsorbent to remove As (V) ions from water. *Mater. Methods Technol.* 2018, vol. 12, no. 1, pp. 110–122.

18. Teshale F., Karthikeyan R., Sahu O. Synthesized bioadsorbent from fish scale for chromium (III) removal. 2020, vol. 130, pp. 102817.

19. Manikandan A. [et al.]. Engineered fish scale gelatin: An alternative and suitable biomaterial for tissue engineering. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers.* 2017, vol. 33, no. 3, pp. 332–346.

20. Guerrero P. [et al.]. Effect of fructose and ascorbic acid on the performance of cross-linked fish gelatin films. *Polymers (Basel).* 2020, vol. 12, no. 3, pp. 570.

Информация об авторах

А. С. Каньшина – преподаватель

О. А. Белых – доктор биологических наук, доцент

Information about the authors

A. S. Kanshina – lecturer

O. A. Belykh – Doctor of Science (Biology)

Статья поступила в редакцию 20.05.2024; одобрена после рецензирования 01.07.2024; принята к публикации 02.07.2024.

The article was submitted 20.05.2024; approved after reviewing 01.07.2024; accepted for publication 02.07.2024.