

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРИВИТОГО СОПОЛИМЕРА МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА НА ТРЕСКОВЫЙ КОЛЛАГЕН В ПРИСУТСТВИИ ПЕРСУЛЬФАТА АММОНИЯ

**Л.Л. Семенычева<sup>✉</sup>, Н.Б. Валетова, Х.А. Албуджамал,  
В.О. Румянцева, А.В. Митин**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород, Россия*

<sup>✉</sup> llsem@yandex.ru

**Аннотация.** Восстановление поврежденных тканей остается серьезной проблемой современной медицины, которая стимулирует постоянную разработку инновационных биоматериалов. Наличие большого количества отходов при переработке продуктов морского происхождения, прежде всего источников коллагена, стало важным стимулом в развитии исследований по использованию природных полимеров в медицинских целях. Серьезными достоинствами коллагена морского происхождения являются известные факты. В частности, многие животные восприимчивы к некоторым заболеваниям, которые могут передаваться человеку, кроме того, использование коллагена животного происхождения имеет религиозные и этические ограничения. В то же время рыбный коллаген по своей природе близок человеческому. Исследования многих ученых показали, что рыбный коллаген является хорошей основой материалов для раневых покрытий и скаффолдов, фактически трендом поисковых исследований последних лет, однако он требует модификации для создания устойчивой трехмерной структуры. В ранее проведенных исследованиях авторами данной работы в инертной атмосфере в условиях фотокатализа видимым светом в присутствии сложного оксида  $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$  в водной дисперсии трескового коллагена и метилметакрилата с модификаторами – биоразлагаемыми полимерами – были получены гидрогели устойчивой трехмерной структуры, пластины-губки на их основе при испытаниях ранозаживления на мелких животных (крысы) показали высокую эффективность. В указанных условиях в полимеризате образуется гидроксильный радикал, взаимодействие которого с органическими субстратами реакционной смеси приводит к образованию устойчивых трехмерных структур – гидрогелей, описанных ранее.

В данной работе получены новые привитые сополимеры полиметилметакрилат-тресковый коллаген, как основа раневых покрытий, с использованием в качестве инициатора окислительно-восстановительной системы персульфат аммония – аскорбиновая кислота, источника гидроксильных радикалов, и проведен анализ их важнейших характеристик в плане разработки гидрогелей: молекулярная масса, содержание коллагена, морфология. Так, содержание азота в привитом сополимере после синтеза заметно уменьшилось в сравнении с исходным образцом коллагена и составляет ~12 %, как это имело место и при фотокатализе. Анализ молекулярно-массовых характеристик раствора полимерного продукта синтеза методом ГПХ показал, что раствор сополимера, полученного с инициатором персульфат аммония – аскорбиновая кислота, в отличие от сополимера при фотокатализе, имеет отдельную высокомолекулярную моду (значения  $M_n \sim 1000$  кДа). В случае фотокатализа наблюдалось смещение кривой ММР исходного полимера коллагена в сторону больших значений молекулярных масс. Анализ СЭМ позволил установить морфологические различия исходного коллагена и привитого сополимера, свидетельствующие о включении фрагментов синтетического полимера в фибриллярную организацию коллагена. Так, лиофильно высушенные образцы коллагена имеют четкие очертания коллагеновых волокон и образовавшихся пор, в то время как на изображениях образца привитого сополимера четко видна более сложная структурно-рельефная организация между волокнами коллагена, очень схожая с таковой для сополимера, полученного в условиях фотокатализа. Выявленные характеристики привитого сополимера ПММА-коллаген, полученного при иницировании персульфат аммония – аскорбиновая кислота, являются основанием для проведения исследований получения гидрогеля на его основе путем введения модифицирующих и сшивающих добавок и использования последнего в регенеративной медицине.

**Ключевые слова:** тресковый коллаген, метилметакрилат, персульфат аммония, привитой сополимер, содержание азота, ГПХ, СЭМ

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания (FSWR-2026-0006) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Новые материалы и ресурсосберегающие технологии» Научно-исследовательского института Химии ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

**Для цитирования:** Особенности получения привитого сополимера метилметакрилата на тресковый коллаген в присутствии персульфата аммония / Л.Л. Семенычева, Н.Б. Валетова, Х.А. Албуджамал и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2026. Т. 18, № 2. С. 110–118. DOI: 10.14529/chem260209

Original article

DOI: 10.14529/chem260209

## FEATURES OF OBTAINING A GRAFT COPOLYMER OF METHYL METHACRYLATE ONTO COD COLLAGEN IN THE PRESENCE OF AMMONIUM PERSULFATE

L.L. Semenycheva<sup>✉</sup>, N.B. Valetova, H.A. Albujamal,  
V.O. Rumyantseva, A.V. Mitin

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>✉</sup> llsem@yandex.ru

**Abstract.** Restoration of damaged tissues remains a serious problem of modern medicine, which stimulates the constant development of innovative biomaterials. The presence of a large amount of waste during the processing of marine products, primarily collagen sources, has become an important incentive for the development of research on the use of natural polymers for medical purposes. The serious advantages of marine collagen are well-known facts. In particular, many animals are susceptible to certain diseases that can be transmitted to humans, and the use of animal-derived collagen has religious and ethical restrictions. At the same time, fish collagen is similar in nature to human collagen. Research by many scientists has shown that fish collagen is a good base of materials for wound coverings and scaffolds, in fact, a trend of exploratory research in recent years. However, it requires modification to create a stable three-dimensional structure. In previous studies conducted by the authors of this paper in an inert atmosphere under conditions of visible light photocatalysis in the presence of a complex oxide  $\text{RbTe}_{1.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_6$  in an aqueous dispersion of cod collagen and methyl methacrylate with modifiers – biodegradable polymers – hydrogels of stable three-dimensional structure were obtained. Sponge-plates based on them have shown high efficiency in wound healing tests on small animals (rats). Under these specified conditions, hydroxyl radical is formed in the polymerizate; their interaction with the organic substrates in the reaction mixture leads to the formation of stable three-dimensional structures – the hydrogels described previously.

In this work, new graft copolymers polymethylmethacrylate-cod collagen were obtained as the basis of wound coatings, using ammonium persulfate - ascorbic acid, a source of hydroxyl radicals, as the initiator of the redox system. The analysis of their most important characteristics in terms of the development of hydrogels was carried out: molecular weight, collagen content, morphology. Thus, the nitrogen content in the graft copolymer after synthesis significantly decreased in comparison with the initial collagen sample and amounts to ~12%, as was the case during photocatalysis. An analysis of the molecular weight characteristics of the polymer synthesis product solution by the GPC method showed that the solution of the copolymer obtained with the initiator ammonium persulfate - ascorbic acid, unlike the copolymer during photocatalysis, has a separate high-molecular mode ( $M_n$  values ~ 1000 kDa). In the case of photocatalysis, the MWD curve of the initial collagen polymer shifted towards higher molecular weights. The SEM analysis allowed us to establish morphological differences between the original collagen and the grafted copolymer, indicating the inclusion of synthetic polymer fragments in the fibrillar organization of collagen. Thus, freeze-dried collagen samples have clear outlines of collagen fibers and formed pores, while the images of the grafted copolymer sample clearly show a more complex structurally relief organization between the collagen fibers, very similar to that for the copolymer obtained under photocatalysis conditions. The identified characteristics of the PMMA-collagen graft copolymer, obtained by initiation with ammonium persulfate – ascorbic acid, provide a basis for conducting research on producing a hydrogel from it by introducing modifying and crosslinking agents and the use in regenerative medicine.

**Keywords:** cod collagen, methyl methacrylate, ammonium persulfate, graft copolymer, nitrogen content, GPC, SEM

**Acknowledgments.** This research was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (assignment FSWR-2026-0006) using the equipment of the Collective Usage Center “New Materials and Resource saving Technologies” (Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod).

**For citation:** Semenycheva L.L., Valetova N.B., Albuajamal H.A., V.O. Rumyantseva, Mitin A.V. Features of obtaining a graft copolymer of methyl methacrylate onto cod collagen in the presence of ammonium persulfate. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2026;18(2):110–118. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem260209

## Введение

Восстановление поврежденных тканей остается серьезной проблемой современной медицины, которая стимулирует постоянную разработку инновационных биоматериалов. Материалы должны быть биосовместимыми, биоразлагаемыми, нетоксичными и т. п. [1–7]. Наличие большого количества отходов при переработке продуктов морского происхождения, прежде всего источников коллагена, стало важным стимулом в развитии исследований по использованию природных полимеров в медицинских целях. Серьезными достоинствами коллагена морского происхождения являются известные факты. В частности, многие животные, такие как птицы, свиньи и другие сельскохозяйственные животные, во всем мире восприимчивы к некоторым заболеваниям, которые могут передаваться человеку, а также использование коллагена животного происхождения имеет религиозные и этические ограничения. Кроме того рыбный коллаген по своей природе, а именно строению и составу, близок человеческому [2, 8–10]. Исследования многих ученых показали, что рыбный коллаген является хорошей основой материалов для раневых покрытий и скаффолдов, фактически трендом поисковых исследований последних лет, однако он требует модификации для создания устойчивой трехмерной структуры [10, 12].

В ранее проведенных исследованиях [12–15] авторами данной работы в инертной атмосфере в условиях фотокатализа видимым светом в присутствии сложного оксида  $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$  в водной дисперсии трескового коллагена (ТК) и метилметакрилата (ММА) с модификаторами – биоразлагаемыми полимерами – были получены гидрогели устойчивой трехмерной структуры, пластины-губки на их основе при испытаниях ранозаживления на мелких животных (крысы) показали значительно более высокую эффективность покрытий в сравнении с коммерческими образцами на основе бычьего коллагена, т. е. они являются перспективными материалами в регенеративной медицине. В указанных условиях в полимеризате проходят окислительно-восстановительные процессы, которые приводят к ряду превращений на рис. 1. Взаимодействие гидроксильного радикала, образующегося в полимеризате, с органическими субстратами реакционной смеси приводит к образованию устойчивых трехмерных структур – гидрогелей.

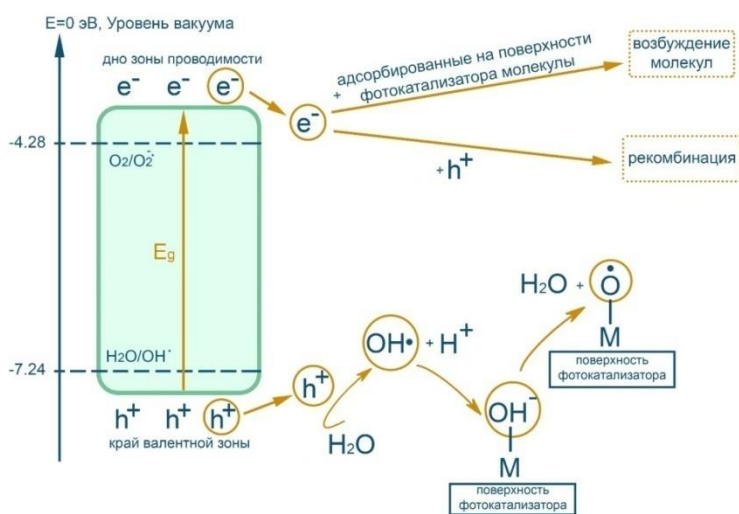


Рис. 1. Схема превращений при фотокатализе в водной дисперсии со сложными оксидами в атмосфере инертного газа [14]

Безусловно, использование каталитических процессов в рамках «зеленой химии», в частности, гетерогенного фотокатализа в условиях мягкого облучения (дневной свет, комнатная температура, светодиодные лампы и т. д.), стало инновационной стратегией в химии, в том числе и в синтезе новых полимерных материалов. В то же время разработка новых материалов для медицины с использованием коммерческих инициаторов остается привлекательной и обоснованной, особенно с учетом возможности масштабирования. В этом плане интеграция персульфатной активации радикальных процессов при получении гидрогелей на основе коллагена является актуальной.

Целью данной работы является получение новых привитых сополимеров полиметилметакрилат (ПММА)-ТК с использованием в качестве инициатора окислительно-восстановительной системы персульфат аммония – аскорбиновая кислота (ПА-АК) и анализ их важнейших характеристик в плане разработки гидрогелей: молекулярная масса, содержание коллагена, морфология.

### Экспериментальная часть

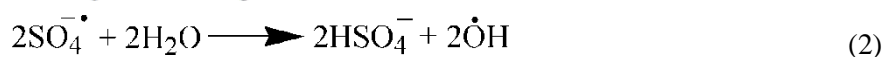
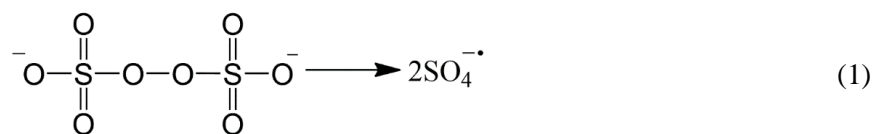
Коллаген был извлечен из кожи трески с использованием 3%-ной уксусной кислоты по методике [16]. Синтез привитого сополимера проводили в течение 4–5 часов при температуре  $45 \pm 5$  °С. Дисперсию готовили путем смешивания реагентов: вода, коллаген, мономер, аскорбиновая кислота в соотношении 85:7,4:7,4:0,2 (масс, %), массовое соотношение инициатора персульфата аммония к ТК/ММА 1:40. Перед проведением реакции эмульсию барботировали аргоном в течение 15 мин при перемешивании. Синтез проводили в токе аргона. Для исследования свойств привитого сополимера образцы сушили до постоянной массы в вакууме.

Молекулярно-массовые характеристики водных растворов определяли методом гелепроникающей хроматографии (ГПХ) с применением высокоэффективного жидкостного хроматографа фирмы Shimadzu CTO20A/20AC (Япония) с программным модулем LC-Solutions-GPC, разделение проводили с применением колонки Tosoh Bioscience TSKgel G3000SWxl с диаметром пор 5 мкм, в качестве детектора применяли низкотемпературный светорассеивающий детектор ELSD-LT II, элюентом служил 0,5 М раствор уксусной кислоты, скорость потока 0,8 мл/мин, для калибровки использовали узкодисперсные образцы декстрана с диапазоном молекулярных масс (ММ) 1–410 кДа (Fluca).

Изучение поверхности лиофильно высушенных полимерных образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-IT300 (JEOLLtd, Japan) с диаметром электронного зонда до 5 нм (рабочее напряжение 20 кВ), с использованием детекторов низкоэнергетичных вторичных электронов и обратно-рассеянных электронов в режиме низкого вакуума для снятия заряда с образцов. Элементный анализ полимера проводили с использованием элементного анализатора Vario EL Cube.

### Результат и их обсуждение

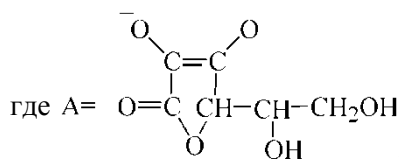
В последние годы технологии, основанные на активации персульфатов, привлекают все больше внимания, например, для очистки загрязненных почв, грунтовых вод и отложений, поскольку персульфаты могут разлагаться с образованием сульфатного ион-радикала ( $\text{SO}_4^{\bullet-}$ ) по схеме (1). Сульфатный ион-радикал в воде реагирует с ней с образованием гидроксильного радикала по схеме (2).



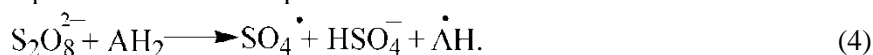
Время жизни сульфатного и гидроксильного радикалов, как любого радикала, у которого неспаренный электрон локализован, чрезвычайно малы и сопоставимы [17–23]. Соответственно, при значительном избытке воды в сравнении с персульфатом в реакционной смеси взаимодействие с органическими субстратами осуществляет гидроксильный радикал. Например, в работе [24] при идентификации радикалов в реакционной смеси с помощью метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) показано, что радикалы  $\text{HO}^{\bullet}$  химически более предпочтительны в радикальных реакциях, на их долю приходится значительная часть продуктов взаимодействия.

Аскорбиновая кислота (АК) проявляет чрезвычайно высокую активность при активации персульфата (схема (3)–(6)) [21, 25].

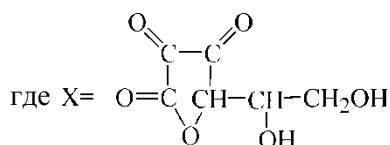
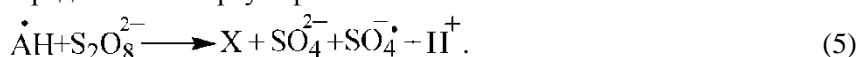
– Диссоциация аскорбиновой кислоты:



– Взаимодействие персульфата аммония с аскорбиновой кислотой:



– Взаимодействие аскорбат-радикалов с персульфат-ионами:



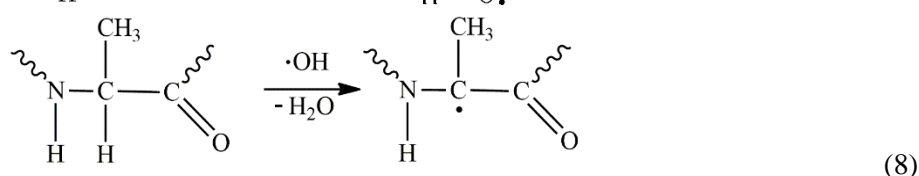
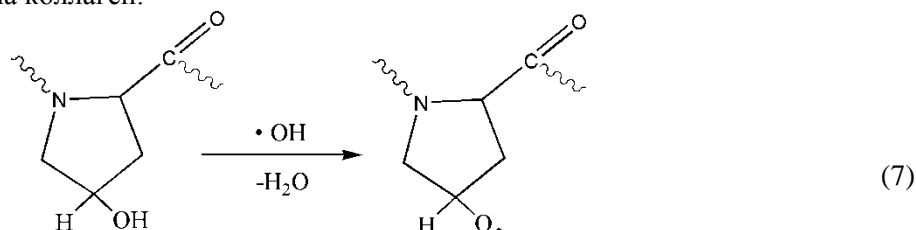
– Взаимодействие аскорбат-радикалов с сульфат-ион-радикалами:



Разработка условий получения гидрогелей на основе рыбного коллагена путем модификации с участием свободных радикалов включает несколько этапов. В частности, при использовании фотокатализа видимым светом в присутствии сложного оксида  $\text{RbTe}_{1.5}\text{W}_{0.5}\text{O}_6$  в водной дисперсии первоначально было доказано образование привитого сополимера ПММА-ТК [13]. На следующем этапе в реакционную смесь добавляли модификаторы и сшивающие агенты для образования гидрогеля [12].

В связи с поставленной целью в данной работе проведен синтез привитого сополимера ПММА-ТК с использованием в качестве инициатора окислительно-восстановительной системы ПА-АК, характеристики которого сравнивали с привитым сополимером ПММА-ТК, полученным в указанных условиях фотокатализа.

В выбранных условиях проведения процесса прививка ММА на ТК осуществляется за счет реакции радикального замещения иницирующим радикалом атома водорода аминокислотных фрагментов коллагена. Такое взаимодействие возможно с гидроксильной группой аминокислотного остатка на примере гидроксипролина по схеме (7) или с атомом водорода углеводородной части молекулы аминокислотного остатка на примере аланина по схеме (8), которое приведет к образованию более стабильного, чем  $\text{HO}\cdot$ -радикал, кислород- или углеродцентрированного радикала, соответственно. Известно, что структурными элементами коллагена являются аминокислотные остатки с углеводородными фрагментами, а также содержащие гидроксильную группу (гидроксипролин (~ 15 %), серин (~ 4 %), гидроксизин (~ 1 %) и др.) [26]. В результате взаимодействия по схемам (7), (8) на поверхности белка образуются радикалы, за счет которых происходит прививка ПММА на коллаген.



Исходная дисперсия реагентов представляет непрозрачную жидкость, в которой капли одной жидкости равномерно распределены внутри другой (рис. 2а). Через несколько минут после начала взаимодействия, благодаря образованию привитого сополимера, жидкость приобретает белый цвет (рис. 2б).



Рис. 2. Фото исходной смеси компонентов (а), смеси после образования привитого сополимера (б)

По окончании синтеза для выделенного из реакционной смеси полимерного продукта определяли ряд важных параметров. Анализ выделенного из водной фазы синтеза полимера свидетельствует об образовании привитого сополимера ПММА-коллаген. Так, содержание азота в привитом сополимере ПММА-коллаген после синтеза заметно уменьшилось в сравнении с исходным образцом коллагена и составило ~12 % (рис. 3), как это имело место и при фотокатализе [13].

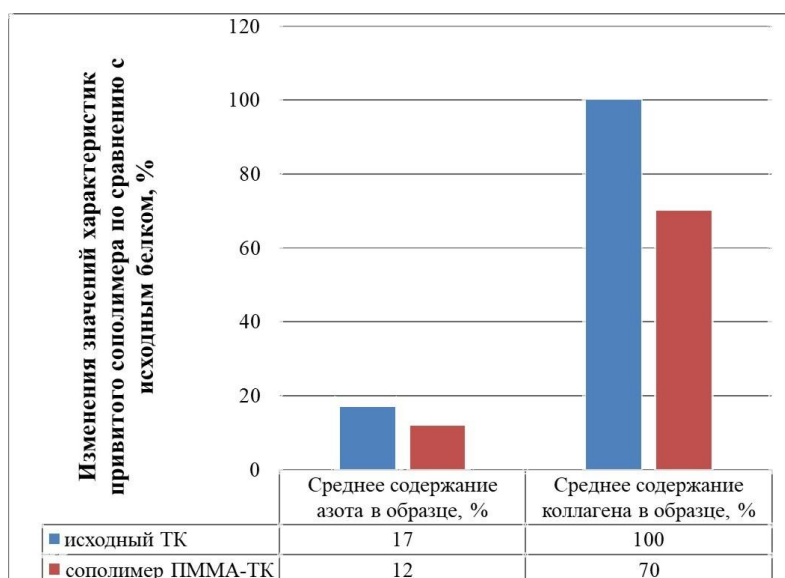


Рис. 3. Содержание азота и коллагена в образцах по данным элементного анализа

Анализ молекулярно-массовых характеристик раствора полимерного продукта синтеза методом ГПХ показал, что раствор сополимера, полученного с инициатором ПА-АК в отличие от сополимера из процесса с фотокатализом, имеет отдельную высокомолекулярную моду (значения  $M_n \sim 1000$  кДа, рис. 4а). В случае фотокатализа наблюдалось смещение кривой ММР исходного полимера ТК в сторону больших значений ММ (рис. 4б). Хотелось бы обратить внимание на тот факт, что раствор перед анализом фильтруется через шприцевой фильтр с диаметром пор 0,45 мкм. При этом образующийся в синтезе сополимер с большим размером частиц, например, в случае сшивки полимерных продуктов за счет реакции рекомбинации радикалов [27] или различной длины привитого сополимера, может остаться на фильтре. В связи с этим, учитывая близкие значения содержания коллагена в привитых сополимерах, полученных при иницировании

ПА-АК и фотокатализе, данные ГПХ анализа и в том, и другом случае свидетельствуют об изменении молекулярно-массовых параметров после прививки ПММА на коллаген.

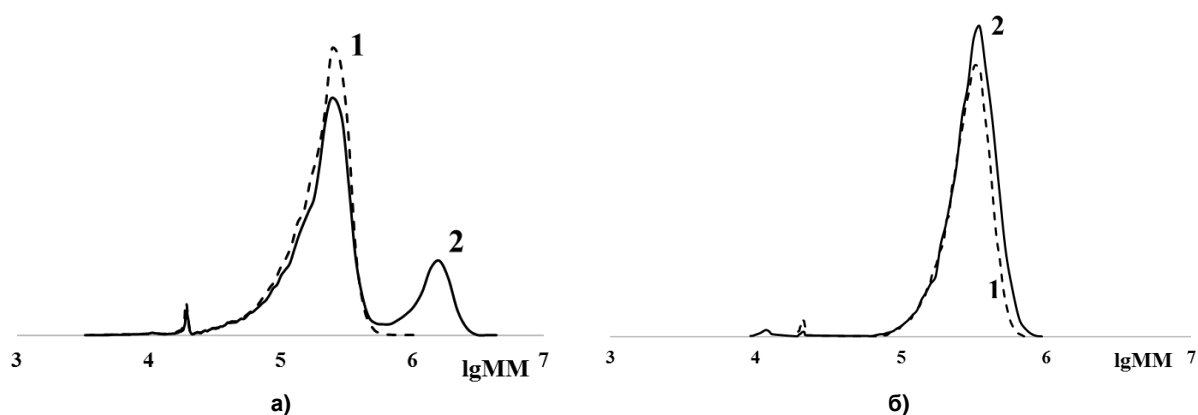


Рис. 4. Кривые ММР исходного коллагена (1) и привитого сополимера ПММА-ТК (2), полученного при иницировании ПА-АК (а) и в условиях фотокатализа (б) [13]

Анализ СЭМ позволил установить морфологические различия исходного коллагена и привитого сополимера ПММА-коллаген, свидетельствующие о включении фрагментов синтетического полимера в фибриллярную организацию коллагена. Так, лиофильно высушенные образцы коллагена имеют четкие очертания коллагеновых волокон и образовавшихся пор (рис. 5а), в то время как на изображениях образца привитого сополимера ПММА-коллаген четко видна более сложная структурно-рельефная организация между волокнами коллагена (рис. 5б), очень схожая с таковой для сополимера, полученного в условиях фотокатализа (рис. 5в) [13].

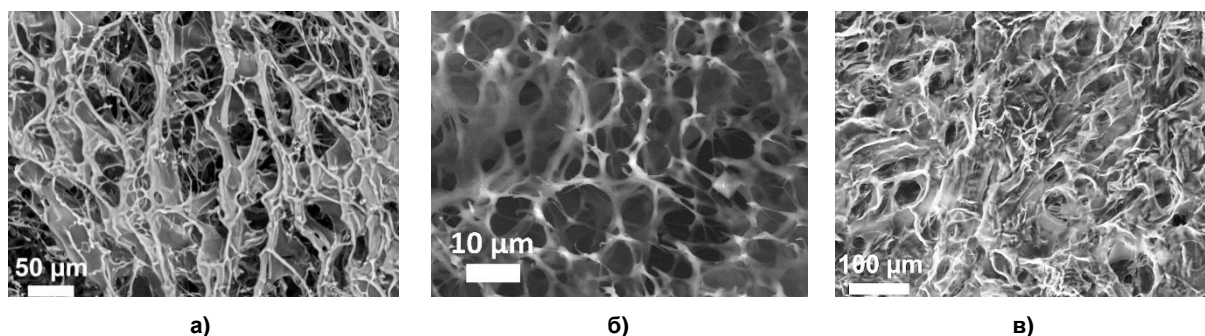


Рис. 5. Изображения СЭМ: ТК (а) [13], привитого сополимера ПММА-ТК, полученного при иницировании ПА-АК (б), привитого сополимера ПММА-ТК, полученного в условиях фотокатализа (в) [13]

Изученные характеристики привитого сополимера ПММА-коллаген, полученного при иницировании ПА-АК, являются основанием для проведения исследований получения гидрогеля на его основе путем введения модифицирующих и сшивающих добавок и использования последнего в регенеративной медицине.

### Заключение

В результате взаимодействия метилметакрилата и рыбного коллагена в водной дисперсии с использованием персульфата аммония в качестве источника свободных радикалов при температуре  $\sim 50$  °С получен, выделен и охарактеризован полимер со свойствами, свидетельствующими об образовании привитого сополимера метилметакрилата на коллаген. В процессе синтеза образовалась фракция с ММ, значительно превышающей ММ исходного трескового коллагена, содержание азота в выделенном полимере значительно уменьшилось, морфология изменилась в сравнении с коллагеном. В реакционной смеси в процессе синтеза в данном случае образуются активные гидроксильные радикалы, как и при фотокатализе видимым светом в присутствии

сложного оксида  $RbTe_{1.5}W_{0.5}O_6$ , которые инициируют привитую полимеризацию. Сопоставление данных элементного анализа и морфологии образовавшихся новых полимеров в случае инициирования персульфатом аммония и фотокатализа позволяет сделать заключение схожести этих характеристик.

#### Список источников

1. *Sionkowska A.* // Prog. Polym. Sci. 2021. V. 122. P. 101452. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101452.
2. *Gomes S., Rodrigues G., Martins G. et al.* // Int. J. Biol. Macromol. 2017. V. 102. P. 1174. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.05.004.
3. *Siddamallappa N.G., Basavaraju M., Sionkowska A. et al.* // Eur. Polym. J. 2024. V. 215. P. 113225. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113225.
4. *Umemori K., Little D.* // Bioprinting. 2025. V. 50. P. e00429. DOI: 10.1016/j.bprint.2025.e00429.
5. *Liu L., Zhong X., Wang A. et al.* // Mater. Today Commun. 2025. V. 46. No. 1. P. 112929. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112929.
6. *Egorikhina M.N., Semenycheva L.L., Chasova V.O. et al.* // Mar. Drugs. 2021. V. 19, No. 9. P. 502. DOI: 10.3390/md19090502.
7. *Rajasree S.R.R., Gobalakrishnan M., Aranganathan L. et al.* // Mater. Sci. Eng. C. 2020. V. 107. P. 110270. DOI: 10.1016/j.msec.2019.110270.
8. *de Souza A., de Almeida Cruz M., de Araújo T.A.* // Cell Tissue Res. 2022. V. 388, No. 3. P. 489. DOI: 10.1007/s00441-022-03625-w.
9. *Ricard-Blum S.* // Cold Spring Harb Perspect Biol. 2011. V. 3, No. 1. P.1. DOI: 10.1101/cshperspect.a004978.
10. *Pacheco D., Silva-Barroso A.S., Gomes A. et al.* // Mater. Des. 2026. V. 261. P. 115282. DOI: 10.1016/j.matdes.2025.115282.
11. *Mendoza-Villafaña J.J., Claudio-Rizo J.A., León-Campos M.I. et al.* // Int. J. Biol. Macromol. 2026. V. 338, Pt 2. P. 149718. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.149718.
12. *Semenycheva L.L., Chasova V.O., Sukhareva A.A. et al.* // Appl. Sci. 2023. V. 13, No. 9. P. 5455. DOI: 10.3390/app13095455.
13. *Semenycheva L.L., Chasova V.O., Fukina D.G. et al.* // Polym. Sci. Ser. D. 2022. V. 15, No.1. P. 110. DOI: 10.1134/S1995421222010166.
14. *Rumyantseva V.O., Semenycheva L.L., Valetova N.B. et al.* // Polymers. 2025. V. 17, No.15. P. 2002. DOI: 10.3390/polym17152002.
15. *Soloveva A.G., Semenycheva L.L., Rumyantseva V.O. et al.* // Polymers. 2025. V. 17, No. 23. P. 3215. DOI: 10.3390/polym17233215.
16. Способ получения рыбного коллагенового гомогенизата: пат. 2810511 Рос. Федерация № 2022132797; заявл. 14.12.22; опубл. 27.12.23, Бюл. N 36. 9 с.
17. *Wu G., Wang J., Wan Q. et al.* // Water Res. 2023. V. 243, P. 120378. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120378.
18. *Xia X., Zhu F., Li J. et al.* // Front. Chem. 2020. V. 8, P. 592056. DOI: 10.3389/fchem.2020.592056.
19. *Wu G., Wang J., Wan Q. et al.* // Water Res. 2023. V. 243, P. 120378. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120378.
20. *Misra G.S., Dubey S.L.* // Colloid Polym. Sci. 1979. V. 257, P. 156. doi.org/10.1007/BF01638141
21. *Hou X., Zhan G., Huang X. et al.* // Chem. Eng. J. 2019. V. 382, P. 122355. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122355.
22. *Blanco-Canella P., Lama G., Sanromán M.Á. et al.* // Toxics. 2022. V. 10, No.9. P. 512. DOI: 10.3390/toxics10090512.
23. *Xu W., Ni C., Deng N. et al.* // Environ. Res. 2024. V. 252, Pt 3. P. 118870. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118870.
24. *Bai S., Wang P., Xu C. et al.* // Water Res. 2026. V. 289, Pt B. P. 125011. DOI: 10.1016/j.watres.2025.125011.

25. Feng R., Chen L., Li W. et al. // J. Hazard. Mater. 2023. V. 459, P. 132152. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132152.

26. Oliveira V., Assis C.R., Costa B. et al. // J. Mol. Struct. 2021. V. 1224, P. 129023. DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.129023.

27. Matyjaszewski K., Davis T.P. Handbook of Radical Polymerization. A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2002. 936 p.

**Семенычева Людмила Леонидовна** – доктор химических наук, доцент, зав. лабораторией нефтехимии НИИ химии, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: llsem@yandex.ru

**Валетова Наталья Борисовна** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории нефтехимии НИИ химии, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: nata-bor-2005@mail.ru

**Албужамал Хуссейн Абдулриджа** – аспирант, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: 191919hussain@mail.ru

**Румянцева Виктория Олеговна** – младший научный сотрудник лаборатории нефтехимии НИИ химии, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: vo.rumyantseva@mail.ru

**Митин Александр Вячеславович** – кандидат химических наук, зав. лабораторией хроматографии, масс-спектрометрии и элементного анализа НИИ химии, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: ckr@ichem.unn.ru

*Статья поступила в редакцию 16 февраля 2026 г.*

*The article was submitted 16 February 2026.*