

Обзорная статья

УДК 678.01

doi:10.32687/1561-5936-2023-27-1-17-25

## Применение некоторых биоразлагаемых полимеров в медицине

Ифтихар Балакишиевич Аббасов

Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета, Таганрог, Россия

iftikhar\_abbasov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4805-8714>

**Аннотация.** Представлен обзор современного состояния исследований в области применения биоразлагаемых полимеров для медицинских целей. Отмечена актуальность темы исследования, описаны современные тенденции в области разработки биоразлагаемых полимеров, создания полимерных защитных покрытий, полимеров с эффектом памяти формы для медицинских изделий различного применения. Представлена классификация современных полимеров для медицинских целей, отмечены категории биоразлагаемых полимеров в зависимости от происхождения сырья, описаны свойства биоразлагаемых полимерных материалов и композитов. Биоразлагаемые полимеры широко используются для контролируемой доставки лекарств и вакцин, в обзоре отмечены современные разработки в данной области. Указаны биоразлагаемые полимеры для инкапсулирования и доставки лекарств, возможность создания наноструктурных полимеров для фармацевтики. Описаны перспективы будущего развития применения биоразлагаемых полимеров в медицине.

**Ключевые слова:** биоразлагаемый полимер; биоактивность; биосовместимость; синтетические полимеры; природные полимеры; медицинские материалы; сплавы магния; ортопедия; имплантаты; лекарственные препараты; наноструктуры для доставки лекарств

**Для цитирования:** Аббасов И. Б. Применение некоторых биоразлагаемых полимеров в медицине // Ремедиум. 2023. Т. 27, № 1. С. 17–25. doi:10.32687/1561-5936-2023-27-1-17-25.

Review article

## Applications of some biodegradable polymers in medicine

Iftikhar B. Abbasov

Engineering and Technology Academy of the Southern Federal University, Taganrog, Russia

iftikhar\_abbasov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4805-8714>

**Abstract.** This paper presents an overview of the current state of research in the field of application of biodegradable polymers for medical purposes. The relevance of the research topic is noted, current trends in the development of biodegradable polymers, the creation of polymer protective coatings, polymers with a shape memory effect for medical products for various applications are described. A classification of modern polymers for medical purposes is presented, categories of biodegradable polymers are noted depending on the origin of raw materials, and the properties of biodegradable polymeric materials and composites are described. Biodegradable polymers are widely used for the controlled delivery of drugs and vaccines, the review notes the current developments in this area. Biodegradable polymers for drug encapsulation and delivery are presented, as well as the possibility of creating nanostructured polymers for pharmaceuticals. The prospects for the future development of the use of biodegradable polymers in medicine are analyzed and described.

**Key words:** biodegradable polymer; bioactivity; biocompatibility; synthetic polymers; natural polymers; medical materials; magnesium alloys; orthopedics; implants; drugs; drug delivery nanostructures

**For citation:** Abbasov I. B. The use of some biodegradable polymers in medicine. *Remedium*. 2023;27(1):17–25. (In Russ.). doi:10.32687/1561-5936-2023-27-1-17-25.

### Введение

В последнее время для медицинских целей всё чаще начали использовать биоразлагаемые полимерные материалы. Современные медицинские технологии позволяют создавать различные материалы со специальными характеристиками. Биоразлагаемые полимеры (БП) достаточно давно и успешно используются в медицине в качестве шовных хирургических материалов, для изготовления ортопедических изделий, доставки лекарственных препаратов, а также матриц для тканевой инженерии [1–3].

БП относятся к высокомолекулярным соединениям, они создаются химическим, микробиологическим синтезом, могут являться продуктами

жизнедеятельности биологических организмов. В результате гидролиза и фотохимического разрушения эти высокомолекулярные соединения в биологически активной среде разлагаются на натуральные составляющие: углекислый газ, метан, воду, биомассу и неорганические частицы. Данное качество является их положительной особенностью по сравнению с аналогами из нефтехимического сырья (этилен, пропилен, лавсан, капрон) [4].

Целью данной работы является обзор некоторых современных публикаций, посвященных применению БП для медицинских, фармацевтических целей, он может быть полезным для исследования и анализа тенденций и прогнозирования развития БП в области медицины.

## Материалы и методы

Для данного исследования в качестве материалов были использованы современные публикации в научных журналах: исследовательские статьи, обзоры отечественных и зарубежных учёных, посвященные применению БП в медицине. Обработка исследовательских материалов была осуществлена методами сбора, анализа, сравнения и синтеза информации. Результатом анализа стала структурированная графическая информация о свойствах и классификации БП. Путём синтеза информации были обозначены перспективы развития данной отрасли.

## Результаты и обсуждение

### Современные тенденции

Отметим основные тенденции в исследованиях в области БП в России и зарубежом. В обзоре [1] представлены основные области применения наноструктурированных полимерных и композитных материалов в медицине. В настоящее время существует потребность в биоразлагаемых материалах. Они востребованы в сердечно-сосудистой хирургии, ортопедии, травматологии и стоматологии, их используют для изготовления штифтов и стентов, протезов кровеносных сосудов, искусственных клапанов сердца, систем искусственного кровообращения [5]. Эти полимеры применяются в клеточной и тканевой инженерии, реконструктивной хирургии в целях создания искусственных органов, восстановления функций повреждённых органов.

Работа [6] посвящена обзору применения БП в медицине и в других областях. Уделено особое внимание созданию БП на основе натуральных продуктов: крахмала и растительных волокон.

В обзоре [7] представлены современные исследования в области БП на основе возобновляемого сырья. Отмечены тенденции и перспективы развития данных материалов. В работе [8] описываются исследования по созданию БП для решения глобальной экологической проблемы: загрязнения окружающей среды отходами полимерных материалов.

Работа [9] посвящена обзору биоразлагаемых композитных материалов с использованием крахмала. Во многих случаях продуктами распада таких материалов являются углекислый газ и вода.

В статье [10] проведен обзор различных БП, их характеристики и применение в биомедицине. В работе сформулированы требования к биоразлагаемым крепежным изделиям, приведены итоги исследования физико-химических параметров биоразлагаемых фиксаторов.

### Применение полилактида, композиты

Полимер полилактид (полиэфир молочной кислоты) является одним из наиболее адаптированных материалов к условиям медицинского применения. В обзоре [11] предоставлены характеристики и свойства данного полимера, а также перспективы его использования в травматологии и ортопедии.

В работе [12] методом конечных элементов моделируется задача определения напряжённо-дефор-

мированного состояния реконструктивных пластин для остеосинтеза лучевой и плечевой костей. В результате моделирования показана возможность применения имплантатов на основе БП и композитов. Сравнены данные для пластин из имплантатной стали, титана, полилактида и композита (полилактид с кальций-фосфатами).

В обзоре [13] представлен анализ публикаций по природным компонентам БП. Растёт число публикаций, посвященных составным компонентам композитов, нанокомпозитов и готовых биоразлагаемых изделий. Для устранения загрязнения окружающей среды предлагается замещение традиционных небiorазлагаемых полимеров композитными БП.

В работе [4] описываются проблемы экологии, избавления от накопления полимерных отходов. Отмечается, что постепенное истощение запасов углеводородов приведет к неизбежному возрастанию себестоимости их производства.

Статья [14] посвящена разработке технологии получения биоразлагаемых полимерных пленок на основе высокомолекулярного полилактида для медицинского и сельскохозяйственного применения. Исследуются механические свойства разработанных полимеров и их биосовместимость.

Целью статьи [15] является изучение и подбор оптимальных условий литья под давлением БП при отливке медицинских имплантатов. При этом учитываются следующие параметры процесса: температура и давление процесса, скорость впрыска, охлаждение изделия, характеристики пресс-формы. В качестве БП используются полимер полимолочной кислоты полилактид (мономер), сополимер молочной и гликолевой кислоты (два разных мономера), которые являются наиболее перспективными для применения в ортопедической и черепно-лицевой хирургии.

В обзоре [16] описываются БП на композитной основе, которые предназначены для использования в ортопедии в качестве в крепежных имплантатах. Исследованы свойства композитов на основе полиэфиров и кальций-фосфатных наполнителей, обсуждаются их проектирование и изготовление.

### Полимеры в ортопедии

В исследовании [17] обобщены последние достижения в производстве полимерных покрытий на основе сплавов магния. Обсуждаются методы повышения коррозионной стойкости и будущие возможности применения этих сплавов в медицине [18, 19]. В конечном итоге основные проблемы и трудности возникают при разработке материалов для имплантатов на основе магния с полимерным покрытием [20].

Ввиду широкого применения биоразлагаемых имплантатов в ортопедии [21] для этих целей часто используются материалы на основе сплавов магния, которые имеет хорошую коррозионную стойкость, биосовместимость, что улучшает процесс регенерации кости [17, 22].

Модификация поверхности с помощью покрытий является практичным вариантом, т. к. это не

только улучшает коррозионную стойкость, но и подготавливает обработанную поверхность для регенерации кости и прикрепления клеток. Благодаря своей биоразлагаемости, биосовместимости биоматериалы на основе сплавов магния имеют большой потенциал в ортопедических применениях.

В этом отношении композитное покрытие может быть возможным вариантом для увеличения силы сцепления органических биополимерных покрытий [23, 24]. Кроме того, формирование композитных покрытий не только улучшает коррозионную стойкость, но также придает сплавам магния потенциальную биоактивность и биосовместимость при длительной эксплуатации.

Основные свойства полимерных покрытий на основе сплавов магния — это биоактивность, биоразлагаемость, устойчивость к коррозии, остеоиндукция, биосовместимость [17]. Под биоактивностью материала покрытия понимается его способность вызывать или регулировать биологическую активность среды окружения. Биоразлагаемость покрытия — это процесс разложения материала при контакте с микроорганизмами, тканями, клетками и биологическими жидкостями. Под коррозионной стойкостью понимается способность материала покрытия сопротивляться процессу коррозии. Остеоиндукция — это свойство материала, когда он становится каркасом для образующейся новой костной ткани. Биосовместимость материала подразумевает его способность не оказывать на организм отрицательного влияния при выполнении своих функций.

Полимеры с эффектом памяти формы также обладают огромным потенциалом для применения в различных областях, включая аэрокосмическую, текстильную, робототехнику и биомедицину, благодаря своим механическим свойствам (мягкости и гибкости) [25, 26]. БП с памятью формы обладают уникальными преимуществами долгосрочной биосовместимости и образования безотходных побочных продуктов, т. к. конечные продукты абсорбируются в процессе метаболизма или ферментативного расщепления [27]. Это также может предотвращать образование биоплёнок или повреждения внутренней ткани из-за имплантата и последующей необходимости вторичной хирургии [28, 29].

В статье [30] новые биоразлагаемые и биосовместимые амфифильные полимеры получены путём модификации сложных полиэфиров кремнийорганическими заместителями. Кремнийорганические фрагменты полимеров образованы силатранами и проявляют гидрофильные и гидрофобные свойства соответственно [31]. Эти свойства влияют на биологическую активность макромолекул, также отмечается противогрибковая активность этих полимерных структур.

#### *Классификация биоразлагаемых полимеров*

Для современных терапевтических применений постоянно разрабатываются новые полимерные материалы. БП можно разделить на различные катего-

рии в зависимости от происхождения сырья (возобновляемого или невозобновляемого) и процессов, используемых при их производстве [10].

Многое из того, что нас окружает — строительные материалы, упаковка, детали автомобилей, ткани, изготовлено из невозобновляемых ресурсов [9]. В естественной среде полимерные изделия практически не разлагаются на протяжении сотен лет.

Все полимеры (или высокомолекулярные соединения) классифицируются по происхождению [13]:

1) природные (биополимеры): например, полисахариды и их производные (карбоксиметилцеллюлоза, оксиалкилцеллюлоза, амилоза, хитозан, декстран, альгинаты); белки (коллаген, эластин, фиброин);

2) синтетические, такие как полиолефины (полиэтилены, включая фторсодержащие, полипропилен), кремнийорганические соединения (полисилоксаны), каучуки специального назначения, поликарбонаты, полиуретаны, полиакрилаты, полилактиды, полигликолиды, полиамиды.

Современные биоразлагаемые полимеры можно поделить на 4 группы:

1) природные полимеры: крахмал, целлюлоза, белки;

2) полимеры, которые являются продуктом жизнедеятельности микроорганизмов (полигидроксиалканоаты, бактериальная целлюлоза);

3) искусственно синтезированные полимеры на основе мономеров (полилактиды);

4) синтетические пластики с биоразлагаемыми добавками [8].

Обзор [32] посвящён применению разнообразных БП. Подробно представлены различные типы БП, их свойства и характеристики, перспектива применения в фармацевтике [33].

Синтетические полимеры также могут быть биоразлагаемыми и небiorазлагаемыми (рис. 1). В основном к небiorазлагаемым полимерам относятся акриловые полимеры, производные целлюлозы, силиконы. Из акриловых можно отметить полиметакрилат, полиметилметакрилат, полигидроэтилметакрилат. Небиоразлагаемые полимеры на основе целлюлозы: метилцеллюлоза, ацетат целлюлозы, нитрат целлюлозы, карбоксиметилцеллюлоза, этилцеллюлоза. К силиконовым полимерам относятся полидиметилсилоксаны и коллоидный кремнезем. В качестве других полимеров можно указать этилвинилацетат, полаксамеры, полаксамин, поливинилпирролидон.

Полиметилметакрилат представляет собой небiorазлагаемый полимер на акриловой основе, который в основном используется для имплантации в качестве костного цемента. Несмотря на то что полиметилметакрилат широко используется, он имеет много недостатков, низкую биосовместимость, не подвергается биологическому разложению, может стать привлекательной средой для размножения бактерий [34].

БП при разложении образуют биосовместимые отходы [35]. К полиангиридам относятся полисебаценовая, полиадипиновая и политерфталевая



Рис. 1. Разновидности синтетических полимеров.



Рис. 2. Разновидности природных полимеров.

кислоты. На фосфоре базируются БП: полифосфаты, полифосфонаты. Полиэстеры имеют более расширенный список: полимолочная кислота, полигликолевая кислота, полидианоны, поликапрактон, полигидроксибутират, полидиоксаноны, полидианоны. Из семейства полиамидов можно отметить полиамнокислоты, полииминокарбонаты. Существуют и другие БП: полициноакрилаты, полиуретаны и полиортоэфир.

Следует подчеркнуть, что БП обладают хорошими терапевтическими свойствами, не имеют воспалительного эффекта, показывают хорошую проницаемость [32, 36].

Как было отмечено выше, природные полимеры делятся на полимеры на основе белка и полисахаридов [13]. На основе белка существуют полимеры желатин, альбумин, коллаген, а полисахаридную осно-

ву имеют хитозан, гиалуроновая кислота, агароза, циклодекстрин, декстран (рис. 2). Эти природные полимеры очень часто используются в системах доставки лекарств, рассмотрим их более подробно.

#### Биоразлагаемые имплантаты в ортопедии

В травматологии и ортопедии достаточно давно используются имплантаты из биоразлагаемых материалов. Для современных биоразлагаемых имплантатов актуальными являются исследования по оптимизации скорости деградации и сохранению жесткости [10]. Часто для этих целей применяются титановые фиксаторы, обладающие инертностью к тканям пациента. К сожалению, они тоже не лишены недостатков:

- требуется повторная операция для извлечения имплантата после сращения кости, что сопровождается стрессом для пациента, вероятностью занесения инфекции;
- избыточная механическая прочность металлических пластин приводит к уменьшению прочности самих костей, замедлению процесса восстановления пациента, повторному перелому и, как следствие, необходимости в дополнительной операции;
- химические процессы, обусловленные высвобождением ионов металлов, могут привести к токсикозу [10, 12].

Использование БП как альтернатива титановым имплантатам обусловлена рядом их преимуществ [15]:

- 1) избежание финансовых, временных затрат и стресса, связанных с необходимостью проведения повторной операции по извлечению металлического импланта по окончании лечения;
- 2) не препятствуют естественному росту костей, что актуально для пациентов детского возраста;
- 3) возможность наблюдения за состоянием пациента с помощью магнитно-резонансной томографии;
- 4) врачам не требуется прохождение специального обучения для работы с биоразлагаемыми имплантатами, поскольку их форма и размеры аналогичны металлическим имплантатам.

Биоразлагаемые фиксаторы не требуют повторного вмешательства, в отличие от металлических. При этом биоразлагаемые материалы не должны быть токсичными, они должны иметь требуемые механические характеристики, быть рентгеноконтрастными и не терять свои свойства при стерилизации [16].

Биоразлагаемые имплантаты можно создавать с добавлением сплавов магния с различными металлами, фосфатами кальция, природными и синтетическими полимерами [10]. Временные медицинские изделия действуют в организме человека за определенный период, потом они разлагаются, не нанося вред организму. При этом скорость разложения должна быть близка к скорости роста новой ткани [16].

### Биоразлагаемые материалы для доставки лекарств

Биоразлагаемые полимеры являются перспективными материалами для разработки новых методов инкапсуляции и доставки лекарств. В последнее десятилетие более широко используется контролируемая доставка лекарств, ферментов, генов, противоопухолевых лекарств и вакцин [37]. Одновременно выявляются и оцениваются новые и модифицированные химические составы полимеров, которые предоставляют собой новые формы носителей лекарств в виде наночастиц, микрочастиц, микросфер, матриксов.

Композитные материалы всё чаще используются для адресной доставки низкомолекулярных компонентов, лекарственных средств. В работе [38] приведены результаты моделирования диффузии композитов на основе хитозана. В качестве примеров таких полимерных медицинских изделий указаны искусственные клапаны сердца, стенты, протезы опорных органов.

На основе матриц из органических кислот создаются ткани различных органов. В качестве материалов для биоматриц-носителей применяются коллаген, хитозан, альгинат. Коллаген практически не проявляет антигенные свойства, а коллагеново-хитозановый комплекс используется в качестве переносного и ранозаживляющего средства [4]. Для создания лекарственных форм нового поколения активно используются наноструктурированные БП. Управляя молекулярной структурой полимеров, можно регулировать физико-химические свойства и время резорбции материалов [1].

Предотвращение рестеноза, тромбоза, обрастания остаётся актуальным для стентов, а для более массивных имплантатов важная проблема — воспалительные реакции. Для контролируемой доставки активных веществ наиболее перспективным является полилактид. Он производится из возобновляемых ресурсов с помощью силосообразующих сельскохозяйственных культур. Некоторые полимерные материалы на базе полилактида используются в медицине для создания хирургических нитей, имплантатов для устранения дефектов хрящевой ткани [14]. Полимерные носители должны обладать инертностью, контролируемой деградацией, биосовместимостью и механической прочностью [10].

Работа [39] посвящена применению нанотехнологий в медицине и бальнеологии. Приведены направления развития нанотехнологий в медицине, доставке активных лекарственных веществ. Отдельно исследуются использование биогенных металлов для медицинских целей. Они участвуют в обмене веществ, в процессах кроветворения, роста, размножения клеточных мембран, тканевом дыхании, иммунных реакциях [39]. В обзоре [36] исследуется использование природных БП для местного или контролируемого высвобождения лекарств при тяжёлых заболеваниях.

### Биоразлагаемые полимеры для доставки лекарств

Рассмотрим некоторые БП, которые часто используются в системе доставки лекарств.

**Хитозан** представляет собой полисахарид с глюкозными звеньями, его получают путём частичного деацетилирования хитина. Хитин обладает хорошей механической прочностью, является биосовместимым, биологически активным и биоразлагаемым, но его использование ограничено из-за низкой растворимости в биологической среде [40]. Хитин извлекается из морских организмов, таких как омары, а также из панцирей крабов, насекомых.

**Альгинаты** — это группа наиболее важных биополимеров, которые являются неразветвленными полисахаридными анионными полимерами [41]. Модифицированная форма альгинатов, которые извлекаются из бурых морских водорослей, нашла широкое применение в биомедицинской и фармацевтической промышленности в качестве эффективного носителя лекарственных средств [42, 43].

**Альбумин** — это натуральный водорастворимый белок и привлекательный макромолекулярный носитель, обладающий способностью к биоразложению. Альбумин неиммуногенен, нетоксичен и биосовместим, успешно используется для лечения рака [44, 45]. Большое количество лекарств может быть включено в матрицу наночастиц, поскольку молекулы альбумина имеют разные варианты связывания [45, 46]. Коммерчески доступными формами альбумина являются овальбумин (яичный белок), сывороточный альбумин человека, альбумин, экстрагированный из соевых бобов, альбумин, присутствующий в капсулах бычьей сыворотки, зерновые и молочные альбумины [47].

**Гиалуроновая кислота** представляет собой анионный полисахарид [48, 49], также известна как гиалуронан. Она присутствует в синовиальной жидкости суставов, во внеклеточном матриксе, в коже и равномерно распределена в тканях тела позвоночных [50, 51]. Гиалуроновая кислота обладает хорошей биосовместимостью, большой вязкоупругостью, биоразлагаемостью, используется для доставки противоопухолевых лекарственных средств [52, 53].

Рассмотренные природные биосовместимые и биоразлагаемые полимеры были исследованы для терапевтического применения. Наночастицы превосходят макро- или обычные системы доставки лекарств [54]. Они могут нейтрализовать инфицированные области, органы, участки опухоли и ткани в организме. Биоразлагаемые и биосовместимые полимеры являются подходящими материалами для разработки новых систем доставки лекарств.

### Перспективы применения биоразлагаемых полимеров

Перспективными для создания лекарственных форм нового поколения считаются наноструктурированные БП. «Управление молекулярной структурой полимеров позволяет регулировать их свойства и процесс взаимодействия с живой тканью» [1].

Актуальным остаётся поиск способов лечения травм опорно-двигательного аппарата. «Использование имплантата позволяет зафиксировать отломки кости в правильном положении и не допустить их смещения во время срастания. Применение металлических крепёжных изделий приводит к необходимости повторного хирургического вмешательства, а использование биоразлагаемых крепёжных изделий сопровождается их деградацией до простых метаболитов, которые выводятся из организма естественным путём» [16].

В настоящее время ведутся разработки по использованию природных полимеров на основе воспроизводимого сырья. «Они используются в качестве добавки в полимерные композиты, что придает биоразлагаемость высокомолекулярным синтетическим материалам. Также с их помощью осуществляется направленный синтез биоразлагаемых полиэфиров гидроксикарбоновых кислот» [4].

Для выявления побочных эффектов БП необходимо время для исследования нетоксичного разложения полимеров в организме. Адаптация наносителей к повседневной клинической практике требует мультидисциплинарного подхода, основанного на клинических, этических и социальных представлениях [55]. Можно прогнозировать, что в самом ближайшем будущем люди получат ощутимую пользу от наномедицины на основе нанотехнологий для лечения многих тяжёлых заболеваний. Нанокompозитные биополимеры также смогут усиливать бактерицидные свойства терапевтических материалов и тканей для спецодежды [56].

### Заключение

В данной работе был сделан компактный обзор современного состояния исследований в области применения БП для некоторых медицинских и фармацевтических целей. Отмечены современные тенденции в области разработки наноструктурных, композитных полимеров, позволяющих создать биобезопасные медицинские приспособления. Представлены классификация современных БП, их недостатки и преимущества, области их применения. Описаны БП для целей ортопедии, доставки лекарств, отмечена возможность создания наноструктур на базе этих полимеров для фармацевтики и медицины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гомзяк В. И., Демина В. А., Разуваева Е. В. и др. Биоразлагаемые полимерные материалы для медицины: от импланта к органу. Тонкие химические технологии. 2017; 12(5): 5—20.
2. Guo B., Ma P. X. Synthetic biodegradable functional polymers for tissue engineering: a brief review. *Sci. China Chem.* 2014; 57(4): 490—500. doi: 10.1007/s11426-014-5086-y
3. Asghari M., Adibkia K., Akbarzadeh A., Davaran S. Biodegradable and biocompatible polymers for tissue engineering application: a review. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.* 2017; 45(2): 185—192. doi: 10.3109/21691401.2016.1146731
4. Гарифуллина Л. И., Ли Н. И., Гарипов Р. М., Миннахметова А. К. Биоразложение полимерных пленочных материалов (обзор). *Вестник Технологического университета.* 2019; 22(1): 47—53.
5. Yee D. T., Koon J. N., Huang Y. et al. Bioresorbable metals in cardiovascular stents: Material insights and progress. *Materialia.* 2020; 22: 100727. doi: 10.1016/j.mta.2020.100727
6. Kolybaba M., Tabil L. G., Panighari S. et al. Биоразлагаемые полимеры: прошлое, настоящее и будущее. *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов.* 2010; (1): 17—33.
7. Вильданов Ф. Ш., Латыпова Ф. Н., Красуцкий П. А., Чанышев Р. Р. Биоразлагаемые полимеры — современное состояние и перспективы использования // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19, № 1. С. 135—139.
8. Васильева Н. Г. Биоразлагаемые полимеры. *Вестник Казанского технологического университета.* 2013; 16(22): 156—157.
9. Подденежный Е. Н., Бойко А. А., Алексеев А. А. и др. Прогресс в получении биоразлагаемых композиционных материалов на основе крахмала (обзор). *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого.* 2015; (2): 49—57.
10. Агаджанян В. В., Пронских А. А., Демина В. А. и др. Биодegradуемые импланты в ортопедии и травматологии. Наш первый опыт. *Политравма.* 2016; (4): 85—93.
11. Нестеренко Т. С. Полимеры и 3D печать в ортопедии. *Сборник статей Международной научно-практической конференции «Интеллектуальный и научный потенциал XXI века».* Уфа; 2017. С. 111—116.
12. Гайнетдинова А. А., Крупнин А. Е., Сорокин Ф. Д. и др. Топологическая оптимизация моделей имплантатов для остеосинтеза костей предплечья на основе биоразлагаемых полимерных материалов. *Сборник трудов XXX Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС — 2018).* М.; 2019: 378—382.
13. Колпакова В. В., Усачев И. С., Соломин Д. А. Биоразлагаемые полимеры: составные биокомпоненты и технологические решения производства. *Пищевая промышленность.* 2019; (12): 51—57. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10197
14. Севостьянов М. А., Каплан М. А., Насакина Е. О. и др. Разработка в интересах медицины и сельского хозяйства биоразлагаемого полимера на основе высокомолекулярного полилактида: механические свойства и биосовместимость. *Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах.* 2020; 490(1): 41—46. doi: 10.31857/S2686953520010148
15. Тастанбеков Д. Б., Турсынбекова М. М. Изготовление медицинских имплантов для остеосинтеза методом литья биоразлагаемых полимеров под давлением. *Химический журнал Казахстана.* 2020; (2): 117—121.
16. Демина В. А., Седуш Н. Г., Гончаров Е. Н. и др. Биоразлагаемые наноструктурированные композиты для хирургии и регенеративной медицины. *Российские нанотехнологии.* 2021; 16(1): 4—22. doi: 10.1134/S1992722321010040
17. Saberi A., Bakhsheshi-Rad H. R., Abazari S. et al. A comprehensive review on surface modifications of biodegradable magnesium-based implant alloy: polymer coatings opportunities and challenges. *Coatings.* 2021; 11: 747. doi: 10.3390/coatings11070747
18. Sezer N., Evis Z., Koç M. Additive manufacturing of biodegradable magnesium implants and scaffolds: review of the recent advances and research trends. *J. Magnes. Alloys.* 2021; 9: 392—415. doi: 10.1016/j.jma.2020.09.014
19. Mei D., Lamaka S. V., Lu X., Zheludkevich M. L. Selecting medium for corrosion testing of bioabsorbable magnesium and other metals — a critical review. *Corros. Sci.* 2020; 1: 108722. doi: 10.1016/j.corsci.2020.108722
20. Radha R., Sreekanth D. Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications — a review. *J. Magnes. Alloys.* 2017; 5: 286—312. doi: 10.1016/j.jma.2017.08.003
21. Kirkland N. T., Birbilis N., Staiger M. P. Assessing the corrosion of biodegradable magnesium implants: a critical review of current methodologies and their limitations. *Acta Biomater.* 2012; 8: 925—936. doi: 10.1016/j.actbio.2011.11.014
22. Киселевский М. В., Анисимова Н. Ю., Полоцкий Б. Е. и др. Биоразлагаемые магниевые сплавы — перспективные материалы медицинского назначения (обзор). *Современные технологии в медицине.* 2019; 11(3): 146—157. doi: 10.17691/stm2019.11.3.18

23. Yu B., Dai J., Ruan Q. et al. Corrosion behavior and mechanism of carbon ion-implanted magnesium alloy. *Coatings*. 2020; 10: 734. doi: 10.3390/coatings10080734
24. Zhang Y., Cao H., Huang H., Wang Z. Hydrophobic modification of magnesium hydroxide coating deposited cathodically on magnesium alloy and its corrosion protection. *Coatings*. 2019; 9: 477. doi: 10.3390/coatings9080477
25. Lee Junsang, Kang Seung-Kyun. Principles for controlling the shape recovery and degradation behavior of biodegradable shape-memory polymers in biomedical. *Micromachines*. 2021; 12: 757. doi: 10.3390/mi12070757
26. Lester B. T., Baxevanis T., Chemisky Y., Lagoudas D. C. Review and perspectives: Shape memory alloy composite systems. *Acta Mech.* 2015; 226: 3907—3960. doi: 10.1007/s00707-015-1433-0
27. Peterson G. I., Dobrynin A. V., Becker M. L. Biodegradable Shape Memory Polymers in Medicine. *Adv. Healthc. Mater.* 2017; 6: 1700694. doi: 10.1002/adhm.201700694
28. Patel K., Purohit R. Future prospects of shape memory polymer nano-composite and epoxy based shape memory polymer — a review. *Mater. Today: Proc.* 2018; 5: 20193—20200. doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.389
29. Xia Y., He Y., Zhang F. et al. A review of shape memory polymers and composites: mechanisms, materials, and applications. *Adv. Mater.* 2021; 33: 2000713. doi: 10.1002/adma.202000713
30. Istratov V. V., Vasnev V. A., Markova G. D. Biodegradable and biocompatible silatrane polymers. *Molecules*. 2021; 26: 1893. doi: 10.3390/molecules26071893
31. Puri J. K., Singh R., Chahal V. K. Silatranes: a review on their synthesis, structure, reactivity and applications. *Chem. Soc. Rev.* 2011; 40: 1791—1840. doi: 10.1039/B925899J
32. Prajapati Sh. K., Jain A., Jain A., Jain S. Biodegradable polymers and constructs: a novel approach in drug delivery. *Eur. Polym. J.* 2019; 120: 109191. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2019.08.018
33. Joseph B., George A., Gopi S. et al. Polymer sutures for simultaneous wound healing and drug delivery — a review. *Int. J. Pharm.* 2017; 524(1—2): 454—466. doi: 10.1016/j.ijpharm.2017.03.041
34. Kluin O. S., van der Mei H. C., Busscher H. J., Neut D. Biodegradable vs. non-biodegradable antibiotic delivery devices in the treatment of osteomyelitis. *Expert Opin. Drug Deliv.* 2013; 10: 341—351. doi: 10.1517/17425247.2013.751371
35. Karamanlioglu M., Preziosi R., Robson G. D. Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly (lactic acid): a review. *Polym. Degrad. Stab.* 2017; 137: 122—130. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.009
36. Idrees H., Zaidi S. Z., Sabir A. et al. A review of biodegradable natural polymer-based nanoparticles for drug delivery applications. *Nanomaterials*. 2020; 10: 1970. doi: 10.3390/nano10101970
37. García M. C. Drug delivery systems based on nonimmunogenic biopolymers. *Engineering of Biomaterials for Drug Delivery Systems*. Elsevier; 2018: 317—344. doi: 10.1016/B978-0-08-101750-0.00012-X
38. Иорданский А. Л., Заиков Г. Е., Берлин А. А. Диффузионная кинетика и гидролиз биоразлагаемых полимеров. Потеря массы и контроль высвобождения низкомолекулярных веществ. *Вестник Технологического университета*. 2015; 18(2): 81—87.
39. Мамучиева М. Б., Компанцев Д. В., Саградян Г. В. Современные аспекты использования наноматериалов в бальнеологии и медицине (обзор литературы). *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Медицина. Фармация*. 2017; (19): 20—28.
40. Shafabakhsh R., Yousefi B., Asemi Z. et al. Chitosan: A compound for drug delivery system in gastric cancer — a review. *Carbohydr. Polym.* 2020; 242: 116403. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116403
41. George M., Abraham T. E. Polyionic hydrocolloids for the intestinal delivery of protein drugs: alginate and chitosan — a review. *J. Control. Release*. 2006; 114(1): 1—14. doi: 10.1016/j.jconrel.2006.04.017
42. Tonnesen H. H., Karlsen J. Alginate in drug delivery systems. *Drug Dev. Ind. Pharm.* 2002; 28: 621—630. doi: 10.1081/DDC-120003853
43. Yang J.-S., Xie Y.-J., He W. Research progress on chemical modification of alginate: a review. *Carbohydr. Polym.* 2011; 84: 33—39. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.11.048
44. Rahimnejad M., Jahanshahi M., Najafpour G. D. Production of biological nanoparticles from bovine serum albumin for drug delivery. *Afr. J. Biotechnol.* 2006; 5: 1918—1923.
45. Joshi M., M. Nagarsenkar, B. Prabhakar Albumin nano-carriers for pulmonary drug delivery: an attractive approach. *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* 2020; 56: 101529. doi: 10.1016/j.jddst.2020.101529
46. Patil G. V. Biopolymer albumin for diagnosis and in drug delivery. *Drug Dev. Res.* 2003; 58: 219—247. doi: 10.1002/ddr.10157
47. Arshady R. Preparation of microspheres and microcapsules by interfacial polycondensation techniques. *J. Microcapsul.* 1989; 6: 13—28. doi: 10.3109/02652048909019898
48. Choi K. Y., K. H. Min, J. H. Na et al. Self-assembled hyaluronic acid nanoparticles as a potential drug carrier for cancer therapy: synthesis, characterization, and in vivo biodistribution. *J. Mater. Chem.* 2009; 19: 102—4107.
49. Schanté C. E., Zuber G., Herlin C. Chemical modifications of hyaluronic acid for the synthesis of derivatives for a broad range of biomedical applications. *Carbohydr. Polym.* 2011; 85: 469—489. doi: 10.1016/j.carbpol.2011.03.019
50. Cheng D., Han W., Yang K. et al. One-step facile synthesis of hyaluronic acid functionalized fluorescent gold nanoprobe sensitive to hyaluronidase in urine specimen from bladder cancer patients. *Talanta*. 2014; 130: 408—414. doi: 10.1016/j.talanta.2014.07.005
51. Zhong W., Pang L., Feng H. et al. Recent advantage of hyaluronic acid for anticancer application: a review of “3S” transition approach. *Carbohydr. Polym.* 2020; 238: 116204. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116204
52. Liu K., Wang Z. Q., Wang S. J. et al. Hyaluronic acidtagged silica nanoparticles in colon cancer therapy: therapeutic efficacy evaluation. *Int. J. Nanomed.* 2015; 10: 6445—6454.
53. Wang H., Sun G., Zhang Z., Ou Y. Transcription activator, hyaluronic acid and tocopheryl succinate multi-functionalized novel lipid carriers encapsulating etoposide for lymphoma therapy. *Biomed. Pharmacother.* 2017; 91: 241—250. doi: 10.1016/j.biopha.2017.04.104
54. Sur S., Rathore A., Dave V. et al. Recent developments in functionalized polymer nanoparticles for efficient drug delivery system. *Nano Struct. Nano Objects*. 2019; 20: 100397. doi: 10.1016/j.nano.2019.100397
55. George A., Shah P. A., Shrivastav P. S. Natural biodegradable polymers based nano-formulations for drug delivery: a review. *Int. J. Pharm.* 2019; 561: 244—264. doi: 10.1016/j.ijpharm.2019.03.011
56. Герцик Ю. Г. Основные тенденции развития биомедицинских и биофармацевтических технологий в биоэкономике. *Ремедиум*. 2022; (1): 50—57. doi: 10.32687/1561-5936-2022-26-1-50-57

## REFERENCES

1. Gomzyak V. I., Demina V. A., Razuvaeva E. V. et al. Biodegradable polymer materials for medicine: from implant to organ. *Fine Chemical Technologies*. 2017; 12(5): 5—20. (In Russ.)
2. Guo B., Ma P. X. Synthetic biodegradable functional polymers for tissue engineering: a brief review. *Sci. China Chem.* 2014; 57(4): 490—500. doi: 10.1007/s11426-014-5086-y
3. Asghari M., Adibkia K., Akbarzadeh A., Davaran S. Biodegradable and biocompatible polymers for tissue engineering application: a review. *Artif. Cells Nanomed. Biotechnol.* 2017; 45(2): 185—192. doi: 10.3109/21691401.2016.1146731
4. Garifullina L. I., Li N. I., Garipov R. M., Minnakhmetova A. K. Biodegradation of polymer film materials (review). *Bulletin of the Technological University*. 2019; 22(1): 47—53. (In Russ.)
5. Yee D. T., Koon J. N., Huang Y. et al. Bioresorbable metals in cardiovascular stents: Material insights and progress. *Materialia*. 2020; 22: 100727. doi: 10.1016/j.mta.2020.100727
6. Kolybaba M., Tabil L. G., Panighari S. et al. Biodegradable polymers: past, present and future. *Problems of the environment and natural resources*. 2010; (1): 17—33. (In Russ.)
7. Vildanov F. Sh., Latypova F. N., Krasutsky P. A., Chanyshev R. R. Biodegradable polymers — current state and prospects for use. *Bashkir Chemical Journal*. 2012; 19(1): 135—139. (In Russ.)
8. Vasilyeva N. G. Biodegradable polymers. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2013; 16(22): 156—157. (In Russ.)

9. Poddenezhny E. N., Boyko A. A., Alekseenko A. A. et al. Progress in obtaining biodegradable starch-based composite materials (review). *Bulletin of the P. O. Sukhoi Gomel State Technical University*. 2015; (2): 49—57. (In Russ.)
10. Agadzhanyan V. V., Pronskikh A. A., Demina V. A. et al. Biodegradable implants in orthopedics and traumatology. Our first experience. *Polytrauma*. 2016; (4): 85—93. (In Russ.)
11. Nesterenko T. S. Polymers and 3D printing in orthopedics. *Collection of articles of the International scientific and practical conference «Intellectual and scientific potential of the XXI century»*. Ufa; 2017: 111—116. (In Russ.)
12. Gainetdinova A. A., Krupnin A. E., Sorokin F. D. et al. Topological optimization of implant models for osteosynthesis of forearm bones based on biodegradable polymeric materials. *Proceedings of the XXX International Innovation conference of young scientists and students (MIKMUS — 2018)*. Moscow; 2019: 378—382. (In Russ.)
13. Kolpakova V. V., Usachev I. S., Solomin D. A. Biodegradable polymers: composite biocomponents and technological solutions for production. *Food industry*. 2019; (12): 51—57. (In Russ.) doi: 10.24411/0235-2486-2019-10197
14. Sevostyanov M. A., Kaplan M. A., Nasakina E. O. et al. Development in the interests of medicine and agriculture of a biodegradable polymer based on high-molecular polylactide: mechanical properties and biocompatibility. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Chemistry, Materials Sciences*. 2020; 490(1): 41—46. (In Russ.) doi: 10.31857/S2686953520010148
15. Tastanbekov D. B., Tursynbekova M. M. Production of medical implants for osteosynthesis by injection molding of biodegradable polymers *Chemical Journal of Kazakhstan*. 2020; (2): 117—121. (In Russ.)
16. Demina V. A., Sedush N. G., Goncharov E. N. et al. Biodegradable nanostructured composites for surgery and regenerative medicine. *Russian Nanotechnologies*. 2021; 16(1): 4—22. (In Russ.) doi: 10.1134/S1992722321010040
17. Saberi A., Bakhsheshi-Rad H. R., Abazari S. et al. A comprehensive review on surface modifications of biodegradable magnesium-based implant alloy: polymer coatings opportunities and challenges. *Coatings*. 2021; 11: 747. doi: 10.3390/coatings11070747
18. Sezer N., Evis Z., Koç M. Additive manufacturing of biodegradable magnesium implants and scaffolds: review of the recent advances and research trends. *J. Magnes. Alloys*. 2021; 9: 392—415. doi: 10.1016/j.jma.2020.09.014
19. Mei D., Lamaka S. V., Lu X., Zheludkevich M. L. Selecting medium for corrosion testing of bioabsorbable magnesium and other metals — a critical review. *Corros. Sci.* 2020; 1: 108722. doi: 10.1016/j.corsci.2020.108722
20. Radha R., Sreekanth D. Insight of magnesium alloys and composites for orthopedic implant applications — a review. *J. Magnes. Alloys*. 2017; 5: 286—312. doi: 10.1016/j.jma.2017.08.003
21. Kirkland N. T., Birbilis N., Staiger M. P. Assessing the corrosion of biodegradable magnesium implants: a critical review of current methodologies and their limitations. *Acta Biomater.* 2012; 8: 925—936. doi: 10.1016/j.actbio.2011.11.014
22. Kiselevsky M.V., Anisimova N. Yu., Polotsky B.E. et al. Biodegradable magnesium alloys as promising materials for medical applications (review). *Sovremennye Tehnologii v Meditsine*. 2019; 11(3): 146—157. doi: 10.17691/stm2019.11.3.18
23. Yu B., Dai J., Ruan Q. et al. Corrosion behavior and mechanism of carbon ion-implanted magnesium alloy. *Coatings*. 2020; 10: 734. doi: 10.3390/coatings10080734
24. Zhang Y., Cao H., Huang H., Wang Z. Hydrophobic modification of magnesium hydroxide coating deposited cathodically on magnesium alloy and its corrosion protection. *Coatings*. 2019; 9: 477. doi: 10.3390/coatings9080477
25. Lee Junsang, Kang Seung-Kyun. Principles for controlling the shape recovery and degradation behavior of biodegradable shape-memory polymers in biomedical. *Micromachines*. 2021; 12: 757. doi: 10.3390/mi12070757
26. Lester B. T., Baxevanis T., Chemisky Y., Lagoudas D. C. Review and perspectives: Shape memory alloy composite systems. *Acta Mech.* 2015; 226: 3907—3960. doi: 10.1007/s00707-015-1433-0
27. Peterson G. I., Dobrynin A. V., Becker M. L. Biodegradable Shape Memory Polymers in Medicine. *Adv. Healthc. Mater.* 2017; 6: 1700694. doi: 10.1002/adhm.201700694
28. Patel K., Purohit R. Future prospects of shape memory polymer nano-composite and epoxy based shape memory polymer — a review. *Mater. Today: Proc.* 2018; 5: 20193—20200. doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.389
29. Xia Y., He Y., Zhang F. et al. A review of shape memory polymers and composites: mechanisms, materials, and applications. *Adv. Mater.* 2021; 33: 2000713. doi: 10.1002/adma.202000713
30. Istratov V. V., Vasnev V. A., Markova G. D. Biodegradable and biocompatible silatrane polymers. *Molecules*. 2021; 26: 1893. doi: 10.3390/molecules26071893
31. Puri J. K., Singh R., Chahal V. K. Silatranes: a review on their synthesis, structure, reactivity and applications. *Chem. Soc. Rev.* 2011; 40: 1791—1840. doi: 10.1039/B925899J
32. Prajapati Sh.K., Jain A., Jain A., Jain S. Biodegradable polymers and constructs: a novel approach in drug delivery. *Eur. Polym. J.* 2019; 120: 109191. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2019.08.018
33. Joseph B., George A., Gopi S. et al. Polymer sutures for simultaneous wound healing and drug delivery — a review. *Int. J. Pharm.* 2017; 524(1—2): 454—466. doi: 10.1016/j.ijpharm.2017.03.041
34. Kluin O. S., van der Mei H. C., Busscher H. J., Neut D. Biodegradable vs. non-biodegradable antibiotic delivery devices in the treatment of osteomyelitis. *Expert Opin. Drug Deliv.* 2013; 10: 341—351. doi: 10.1517/17425247.2013.751371
35. Karamanlioglu M., Preziosi R., Robson G. D. Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly (lactic acid): a review. *Polym. Degrad. Stab.* 2017; 137: 122—130. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.009
36. Idrees H., Zaidi S. Z., Sabir A. et al. A review of biodegradable natural polymer-based nanoparticles for drug delivery applications. *Nanomaterials*. 2020; 10: 1970. doi: 10.3390/nano10101970
37. García M. C. Drug delivery systems based on nonimmunogenic biopolymers. *Engineering of Biomaterials for Drug Delivery Systems*. Elsevier; 2018: 317—344. doi: 10.1016/B978-0-08-101750-0.00012-X
38. Jordansky A. L., Zaikov G. E., Berlin A. A. Diffusion kinetics and hydrolysis of biodegradable polymers. Weight loss and control of the release of low molecular weight substances. *Bulletin of the Technological University*. 2015; 18(2): 81—87. (In Russ.)
39. Mamuchieva M. B., Kompantsev D. V., Sagradyan G. V. Modern aspects of the use of nanomaterials in balneology and medicine (literature review). *Scientific statements of the Belgorod State University. Series: Medicine. Pharmacy*. 2017; (19): 20—28. (In Russ.)
40. Shafabakhsh R., Yousefi B., Asemi Z. et al. Chitosan: A compound for drug delivery system in gastric cancer — a review. *Carbohydr. Polym.* 2020; 242: 116403. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116403
41. George M., Abraham T. E. Polyionic hydrocolloids for the intestinal delivery of protein drugs: alginate and chitosan — a review. *J. Control. Release*. 2006; 114(1): 1—14. doi: 10.1016/j.jconrel.2006.04.017
42. Tonnesen H. H., Karlsen J. Alginate in drug delivery systems. *Drug Dev. Ind. Pharm.* 2002; 28: 621—630. doi: 10.1081/DDC-120003853
43. Yang J.-S., Xie Y.-J., He W. Research progress on chemical modification of alginate: a review. *Carbohydr. Polym.* 2011; 84: 33—39. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.11.048
44. Rahimnejad M., Jahanshahi M., Najafpour G. D. Production of biological nanoparticles from bovine serum albumin for drug delivery. *Afr. J. Biotechnol.* 2006; 5: 1918—1923.
45. Joshi M., M. Nagarsenkar, B. Prabhakar Albumin nano-carriers for pulmonary drug delivery: an attractive approach. *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* 2020; 56: 101529. doi: 10.1016/j.jddst.2020.101529
46. Patil G. V. Biopolymer albumin for diagnosis and in drug delivery. *Drug Dev. Res.* 2003; 58: 219—247. doi: 10.1002/ddr.10157
47. Arshady R. Preparation of microspheres and microcapsules by interfacial polycondensation techniques. *J. Microcapsul.* 1989; 6: 13—28. doi: 10.3109/02652048909019898

48. Choi K. Y., K. H. Min, J. H. Na et al. Self-assembled hyaluronic acid nanoparticles as a potential drug carrier for cancer therapy: synthesis, characterization, and in vivo biodistribution. *J. Mater. Chem.* 2009; 19: 102—4107.
49. Schanté C. E., Zuber G., Herlin C. Chemical modifications of hyaluronic acid for the synthesis of derivatives for a broad range of biomedical applications. *Carbohydr. Polym.* 2011; 85: 469—489. doi: 10.1016/j.carbpol.2011.03.019
50. Cheng D., Han W., Yang K. et al. One-step facile synthesis of hyaluronic acid functionalized fluorescent gold nanoprobe sensitive to hyaluronidase in urine specimen from bladder cancer patients. *Talanta.* 2014; 130: 408—414. doi: 10.1016/j.talanta.2014.07.005
51. Zhong W., Pang L., Feng H. et al. Recent advantage of hyaluronic acid for anticancer application: a review of “3S” transition approach. *Carbohydr. Polym.* 2020; 238: 116204. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116204
52. Liu K., Wang Z. Q., Wang S. J. et al. Hyaluronic acid tagged silica nanoparticles in colon cancer therapy: therapeutic efficacy evaluation. *Int. J. Nanomed.* 2015; 10: 6445—6454.
53. Wang H., Sun G., Zhang Z., Ou Y. Transcription activator, hyaluronic acid and tocopheryl succinate multi-functionalized novel lipid carriers encapsulating etoposide for lymphoma therapy. *Biomed. Pharmacother.* 2017; 91: 241—250. doi: 10.1016/j.biopha.2017.04.104
54. Sur S., Rathore A., Dave V. et al. Recent developments in functionalized polymer nanoparticles for efficient drug delivery system. *Nano Struct. Nano Objects.* 2019; 20: 100397. doi: 10.1016/j.nano.2019.100397
55. George A., Shah P. A., Shrivastav P. S. Natural biodegradable polymers based nano-formulations for drug delivery: a review. *Int. J. Pharm.* 2019; 561: 244—264. doi: 10.1016/j.ijpharm.2019.03.011
56. Gertsik Yu. G. Main trends of biomedicine and biopharmaceutical technologies development in bioeconomics. *Remedium.* 2022; (1): 50—57. (In Russ.) doi: 10.32687/1561-5936-2022-26-1-50-57

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.07.2022; одобрена после рецензирования 20.07.2022; принята к публикации 20.02.2023.

The article was submitted 05.07.2022; approved after reviewing 20.07.2022; accepted for publication 20.02.2023.