[1] Медицинский центр «Тандем Плюс», Ярославль

[2] Клиника Hormone Life, Москва

[3] Городская клиническая больница № 31, Санкт-Петербург

Современные нанотехнологии в фармакотерапии хронического простатита

И.А. Тюзиков, к.м.н.[1], Е.А. Греков[2], А.В. Смирнов[3]

Адрес для переписки: Игорь Адамович Тюзиков, phoenix-67@list.ru

Для цитирования: Тюзиков И.А., Греков Е.А., Смирнов А.В. Современные нанотехнологии в фармакотерапии хронического простатита. Эффективная фармакотерапия. 2026; 22 (39): 32–47.

DOI 10.33978/2307-3586-2026-22-39-32-47

Хронический простатит является одной из наиболее часто диагностируемых патологий у мужчин различного возраста. При этом результаты традиционной фармакотерапии этого заболевания в ряде случаев остаются неудовлетворительными, что связано с его сложным мультифакторным патогенезом и анатомо-физиологическими особенностями предстательной железы (ПЖ) в норме и при хроническом воспалении, существенно затрудняющими проникновение, распределение и накопление лекарственных препаратов в высоких дозах в ткани органа. Вместе с тем внедрение в некоторые области медицины и фармакологии нанотехнологий позволяет уже сегодня создавать специальные системы таргетной доставки лекарств в различные ткани на основе наноносителей (наночастиц), которые позволяют преодолеть вышеуказанные проблемы.

Цель. *На основе результатов современных исследований изучить текущие разработки наноматериалов для создания систем таргетной доставки наноразмерных лекарственных препаратов в ПЖ и перспективы их клинического внедрения для оптимизации фармакотерапии хронических воспалительных заболеваний ПЖ (хронических простатитов).*

Основные положения. *При хроническом простатите традиционная фармакотерапия нередко неэффективна: сложная анатомия органа и воспалительная микросреда ПЖ (венозная конгестия, микроциркуляторные нарушения, гипоксия, окислительный стресс и другие факторы) мешают лекарствам достигать очага воспаления и воздействовать на механизмы его возникновения и поддержания, инфекционные агенты и бактериальные биопленки. Наноразмерные системы доставки преодолевают эти барьеры благодаря лучшему проникновению в ткани, контролируемому высвобождению активного вещества и адаптивности. Для фармакотерапии хронического простатита разработаны и тестируются органические, биологические и неорганические наноносители лекарственных средств. Для их изучения проведен поиск полнотекстовых публикаций на любом языке за период 2020–2026 гг. в научных поисковых системах PubMed и Google Scholar с использованием ключевых слов «хронический простатит», «наноматериалы», «наночастицы», «лечение хронического простатита», «наночастицы в лечении хронического простатита» (chronic prostatitis, nanomaterials, nanoparticles, treatment of chronic prostatitis, nanoparticles in the treatment of chronic prostatitis), из которых в итоге 84 публикации вошли в аналитическую часть обзора.*

Различные неорганические наночастицы (металлы, их сплавы или оксиды) не только способны целенаправленно доставлять лекарства в ПЖ, но и обладают собственными антибактериальным, противовоспалительным и антиоксидантным эффектами и способны разрушать микробные

биопленки. Однако у неорганических носителей есть проблема токсичности, потенциального взаимодействия, накопления и длительного сохранения в тканях ПЖ с практически не изученными кратко- и долгосрочными последствиями для безопасности их применения. Поэтому сейчас активнее разрабатывают органические наноносители, которые являются гипоаллергенными, биосовместимыми и биоразлагаемыми. Вместе с тем, несмотря на большое количество предложенных для потенциального использования при хроническом простатите наноносителей, подавляющее большинство разработок находятся на доклинических или ранних клинических стадиях, а ключевыми нерешенными задачами остаются стандартизация свойств наночастиц (размер, форма, покрытие) и их клиническая валидация.
Заключение. *В настоящее время в урологической практике нет наноразмерных лекарственных препаратов, официально зарегистрированных и разрешенных для фармакотерапии хронических простатитов, однако данное научно-практическое направление имеет огромный фармакотерапевтический потенциал. Необходимы дальнейшие крупные многоцентровые высокодоказательные клинические исследования, чтобы подтвердить эффективность, а также оценить кратко- и долгосрочную безопасность тестируемых наноразмерных лекарственных средств для лечения хронического простатита и быстрее внедрить их в рутинную урологическую практику.*

Ключевые слова: *хронический простатит, нанотехнологии, наночастицы, системы доставки лекарственных средств, наноразмерные лекарственные средства, фармакотерапия*

Введение

Последние 50 лет ознаменовались поистине революционным научным прогрессом в сфере нанотехнологий и создания наноматериалов, которые сегодня нашли масштабное практическое применение в различных отраслях человеческой деятельности, включая промышленное производство, оборонный комплекс, информационные технологии, радиоэлектронику, энергетику, транспорт, биотехнологии, сельское хозяйство, фармакологию и медицину. Прогнозируется, что в течение ближайших двух десятилетий именно нанотехнологии и наноматериалы будут играть ключевую роль в научно-техническом, экономическом и военном развитии, оказывая значительное влияние на эволюцию мировой науки и техники в целом [1, 2].

В современной фармакологии и медицине нанотехнологии стали абсолютным центром сосредоточения научно-практического интереса со стороны исследователей и клиницистов благодаря уникальным свойствам наноматериалов, которые обеспечивают по сравнению с традиционными путями введения лекарственных средств (энтеральным, парентеральным, ингаляционным, аппликационным и другими) гораздо более высокие показатели целенаправленности доставки и специфичности взаимодействия препаратов с клетками и тканями организма, что, безусловно, приводит к существенному повышению эффективности и безопасности фармакотерапии заболеваний человека [3].

Наноматериалы не только служат специфическими и высокоточными носителями лекарственных средств в различных системах доставки к пораженным клеткам и органам, повышая эффективность медикаментозной терапии и сводя к минимуму ее побочные эффекты, но и играют важнейшую роль в тканевой инженерии, лечении ран и регенеративной медицине [1–3]. При этом разработка и активное внедрение наноматериалов в медицине привели к оптимизации лечения многих социально значимых заболеваний, а также к существенному прогрессу в области методов диагностики. В частности, именно нанотехнологии позволили разработать наилучшие современные системы инструментальной диагностической визуализации тканей и органов человека с ультравысоким разрешением (магнитно-резонансная томография (МРТ), компьютерная томография), облегчающие раннее выявление и мониторинг лечения большинства заболеваний человека [4].

Таким образом, область применения наноматериалов (наночастиц) в медицине очень широка – от усовершенствования медицинской аппаратуры для диагностической визуализации до разработки наиболее эффективных и безопасных методов целенаправленной доставки лекарств, что в конечном итоге направлено на улучшение результатов современной фармакотерапии и повышение качества жизни пациентов [5, 6]. В этой связи сегодня активно развивается новая отрасль – наномедицина, основанная на применении нанотехнологий и наноматериалов, которая имеет три ключевых практических направления: диагностика заболеваний, контролируемая (целенаправленная) доставка лекарств при различных заболеваниях и регенеративная медицина. Вместе с тем совершенно очевидно, что научно-практический потенциал нанотехнологий в медицине значительно шире [7].

Современная урологическая фармакотерапия проводится с помощью традиционных способов доставки лекарственных средств в организм пациента (чаще пероральный, парентеральный, трансректальный, реже трансназальный), которые далеко не во всех случаях позволяют избежать проблем индивидуальной фармакодинамики, фармакокинетики и мета-

болизма. Это ведет к недостаточному накоплению лекарственного препарата в органе и существенному снижению эффективности проводимой фармакотерапии социально значимых заболеваний, к которым относятся, в частности, хронические воспалительные заболевания предстательной железы (ПЖ) (хронические простатиты).

Воспалительные заболевания ПЖ входят в число наиболее распространенных болезней мочеполовой системы у мужчин всех возрастов. Согласно статистике, примерно половина мужчин когда-либо страдали хотя бы от одного эпизода простатита, а порядка 25% от всего объема медицинских услуг, предоставляемых урологическими клиниками, составляет амбулаторное лечение по поводу данного заболевания [8]. В соответствии с Международной классификацией, предложенной Национальными институтами здоровья США (National Institutes of Health) в 1995 г., все простатиты принято делить на четыре категории: I – острый бактериальный простатит (ОБП); II – хронический бактериальный простатит (ХБП); III – хронический абактериальный простатит, или синдром хронической тазовой боли (ХАП/СХТБ), IIIA – воспалительный ХАП/СХТБ, IIIB – невоспалительный ХАП/СХТБ; IV – бессимптомный (латентный, или гистологический) простатит. При этом на долю ХАП/СХТБ приходится 90–95% всех случаев простатита [9].

Таким образом, хронические простатиты являются очень гетерогенной с точки зрения этиологии и патогенеза группой воспалительных заболеваний ПЖ, и каждая из категорий предполагает применение определенных методов диагностики и лечения, включая медикаментозное. Однако, согласно данным современной литературы, кратко- и долгосрочные результаты доступных в настоящее время методов медикаментозного лечения хронических простатитов по-прежнему нередко остаются неудовлетворительными, что требует научного поиска, разработки и внедрения в клиническую практику новых, более эффективных опций, направленных на оптимизацию традиционной фармакотерапии [10].

Цель обзора литературы – на основе результатов современных исследований изучить текущие разработки наноматериалов для создания систем таргетной доставки наноразмерных лекарственных препаратов в ПЖ и перспективы их клинического внедрения для оптимизации фармакотерапии хронических воспалительных заболеваний ПЖ (хронических простатитов).

Для достижения целей обзора был проведен поиск полнотекстовых публикаций на любом языке за период 2020–2026 гг. в базах данных PubMed и Google Scholar с использованием ключевых слов «хронический простатит», «наноматериалы», «наночастицы», «лечение хронического простатита», «наночастицы в лечении хронического простатита» (chronic prostatitis, nanomaterials, nanoparticles, treatment of chronic prostatitis, nanoparticles in the treatment of chronic prostatitis).

В обеих базах данных по приведенным ключевым словам за указанный период было выявлено 1 544 847 публикаций (429 297 в PubMed и 1 115 550 в Google Scholar), подавляющее большинство из которых были на английском языке. Из этого количества было отобрано 84 полнотекстовые публикации, которые составили основу аналитической части обзора.

Воспалительные заболевания предстательной железы (простатиты): проблемы традиционной фармакотерапии

Пожалуй, наиболее понятным с точки зрения этиологии, патогенеза и, соответственно, тактики выбора метода фармакотерапии из всех вышеописанных категорий простатитов на сегодняшний день представляется ОБП (категория I). Он составляет около 5% в общей структуре всех простатитов и практически всегда проявляется как острое инфекционно-воспалительное поражение ПЖ преимущественно бактериальной этиологии с характерными локальными простатическими симптомами в сочетании с симптомами общей (системной) интоксикации с обязательной лихорадкой, что отличает ОБП от всех хронических форм заболевания [11]. Всем больным ОБП назначается этиотропная парентеральная антибактериальная терапия в соответствии с рекомендациями по ведению больных осложненной инфекцией мочевых путей (ИМП): введение высоких доз бактерицидных противомикробных препаратов (пенициллины широкого спектра действия, цефалоспорины третьего поколения или фторхинолоны), которые на начальной стадии лечения можно комбинировать с аминогликозидами. После стабилизации состояния пациентов переводят на этиотропную пероральную антибактериальную терапию, которую следует продолжать указанными препаратами в общей сложности еще в течение 2–4 недель [11].

В отличие от ОБП (категория I), ХБП (категория II) и ХАП/СХТБ (категории IIIA и IIIB) не имеют столь яркой клинической картины, а протекают как первично хронические, непрерывно рецидивирующие и прогрессирующие варианты заболевания. Латентный простатит (категория IV) вообще протекает бессимптомно и выявляется случайно [12]. В свою очередь, разграничение ХБП и ХАП/СХТБ в настоящее время считается очень условным, поскольку их клинические проявления однотипны и сводятся к постоянному либо периодическому хроническому болевому синдрому в области малого таза или ПЖ в течение не менее трех месяцев, нарушениям мочеиспускания и половой функции. Только идентификация инфекционного агента в секрете ПЖ по результатам микробиологического исследования в определенной степени позволяет дифференцировать ХБП от ХАП/СХТБ [12]. Если при бактериальных формах простатита (категория I или II) четко и убедительно прослеживается ведущая роль инфекционных (прежде всего, бактериальных) этиологических факторов, то при простатите категории IIIA/B патогенетическая роль инфекционного агента представляется неубедительной, либо недоказанной, либо вовсе отсутствует при проведении стандартных микробиологических тестов [11, 12].

Таким образом, несмотря на то что все категории хронических простатитов (за исключением латентного простатита категории IV) имеют практически однотипную клиническую картину, с точки зрения этиологии и патогенеза они представляются очень гетерогенными заболеваниями, требующими персонального подхода к диагностике и выбору методов фармакотерапии у каждого конкретного пациента. При ОБП и ХБП терапией первой линии остается эмпирическая или этиотропная антимикробная химиотерапия, которая позволяет обеспечить эрадикацию инфекционного агента из простатического секрета, что сопровождается регрессом или полным купированием клинических симптомов заболевания на фоне улучшения или полной нормализации микробиологических диагностических тестов [11, 12]. При ХАП/СХТБ, в связи с недоказанностью участия инфекционных агентов или их отсутствием по результатам микробиологических диагностических тестов, этиотропная антимикробная химиотерапия не рекомендуется, а структура и объем фармакотерапевтических мероприятий подбираются персонально для каждого пациента в зависимости от выявленных у него индивидуальных патогенетических факторов заболевания [12].

Патогенез воспалительных заболеваний ПЖ чрезвычайно сложен и включает множество факторов: наличие патогенной инфекции (инфекционное воспаление), аутоиммунные реакции или аномальный иммунный ответ с развитием субклинического цитокин-опосредованного персистирующего хронического асептического (неинфекционного) воспаления в органе, дисбаланс половых гормонов, дисфункция мочеиспускания, нейромышечная дисфункция органов тазового дна, нарушение регионарной гемодинамики и микроциркуляции ПЖ, нарушение нормального микробиома ПЖ, дефицит нутриентов, окислительный стресс, психологические факторы, стрессы и другие, каждый из который необходимо полноценно скомпенсировать для достижения наилучшего результата фармакотерапии заболевания [11, 12].

Все вышесказанное свидетельствует о том, что, несмотря на более чем 200-летнюю историю изучения, простатит в целом как заболевание и особенно хронический простатит как вариант его течения до сих пор остаются патогенетически «темной лошадкой» урологии. Давняя идея вылечить хронический простатит одним лекарственным препаратом (мономодальная терапия), не выдержав никакой критики, по счастью, уже давно канула в Лету, но даже современная традиционная полимодальная фармакотерапия довольно часто дает неудовлетворительные результаты (табл. 1) [13–15].

Улучшение результатов полимодальной фармакотерапии хронических простатитов остается сегодня одной из важнейших задач современной урологии, для решения которой предлагаются различные пути:

- выявление в ходе диагностики по возможности всех потенциальных механизмов заболевания у конкретного пациента, каждый из которых требует своей индивидуальной фармакологической коррекции (комплексная диагностика с позиций междисциплинарного подхода);
- персонализация и комплексный подход к выбору фармакотерапии при любой категории хронического простатита;
- проведение тщательной комплексной микробиологической лабораторной диагностики секрета ПЖ и уретры с целью получения максимально полноценной и объективной информации о наличии или отсутствии инфекционного агента и использование локальных (регионарных) данных о распространенности типичных уропатогенов и их антибиотикорезистентности для планирования целенаправленной антимикробной химиотерапии инфекционных форм заболевания;
- выбор антимикробных препаратов при ХБП с учетом их фармакокинетики (ориентир на антибиотики, которые доказанно хорошо проникают в ткань и секрет ПЖ, – фторхинолоны, некоторые макролиды, тетрациклины, триметоприм);
- обеспечение достаточной длительности курса антимикробной химиотерапии при ХБП (не менее 4–6 недель) согласно имеющимся российским и зарубежным рекомендациям;
- использование комбинаций препаратов разных групп и адъювантов (в частности, комбинаций антибиотиков с веществами, помогающими разрушать биопленки, например, с ферментами и специфическими ингибиторами), а также средств, модулирующих локальный иммунный ответ;
- поиск новых подходов к проведению фармакотерапии хронического простатита [11, 12].

С этой точки зрения сегодня активно развиваются направления, выходящие за рамки классической фармакологии, и прежде всего ведется поиск и разработка методов таргетной доставки лекарств в ПЖ с использованием наноматериалов (наночастиц).

Общий обзор современных наноматериалов и нанотехнологий

Основными структурными компонентами современных нанотехнологий являются высокодисперсные частицы вещества размером менее 100 нанометров (нм) хотя бы в одном измерении с заданной структурой и свойствами [16]. Наночастицы подразделяют на основе их размерности на четыре основных типа:

- нульмерные наночастицы – структуры, в которых наночастицы изолированы друг от друга и не удлинены ни по одному из трех пространственных направлений: квантовые точки (например, нанокристаллы полупроводников – сульфида цинка (ZnS), селенида кадмия (CdSe) и др.); нанокластеры; гетерогенные частицы; квантовые точки типа «ядро – оболочка»; концентрические нульмерные частицы;
- одномерные наночастицы, у которых поперечные размеры находятся в наноинтервале, а длина может быть сколь угодно велика: нановолокна (на-

Таблица 1. Основные проблемы традиционной фармакотерапии хронических простатитов [13–15]

Проблема	Комментарий
Недостаточное проникновение антибиотиков и других лекарственных препаратов в ПЖ	Гематопростатический барьер многие препараты не преодолевают в достаточной мере. В условиях хронического воспаления и отека в ткани ПЖ развивается венозная конгестия и существенно нарушается микроциркуляция, что затрудняет обмен между кровеносным руслом и клетками ПЖ. Особенно это проявляется при развитии и прогрессировании фиброза ПЖ как реакции на длительную гипоксию органа, а также при формировании в ней конкрементов. Даже если антибактериальный препарат активен против возбудителя *in vitro*, в самой ткани и секрете ПЖ его концентрация может оказаться слишком низкой и потому неэффективной. Это касается не только антибиотиков, но и лекарственных препаратов других фармакологических групп, рекомендованных для проведения полимодальной фармакотерапии хронического простатита (например, нестероидных противовоспалительных средств, α1-адреноблокаторов и др.)
Растущая антибиотикорезистентность	Многие уропатогены (например, некоторые штаммы кишечной палочки, энтерококки, стафилококки) вырабатывают устойчивость к широко используемым группам – фторхинолонам, тетрациклинам, ко-тримоксазолу. Из-за этого лечение «вслепую» часто оказывается неэффективным
Формирование бактериальных биопленок	Бактерии в составе биопленок гораздо менее уязвимы для антибиотиков: проницаемость для препаратов падает в 100–1000 раз по сравнению со свободноплавающими бактериями. Биопленки создают защитный матрикс, который дополнительно изолирует патогены. Это одна из главных причин хронизации и частых рецидивов хронических простатитов
Не всегда верно определяется инфекционный компонент или назначается антибиотик	Назначение антибиотиков при ХАП/СХТБ IIIA и IIIB, когда уропатогены в бакпосевах не выявляются, может способствовать нарушению простатического нормомикробиома и селекции резистентных штаммов уропатогенов
Сопутствующие факторы, снижающие эффективность терапии	Протоковая обструкция (нарушение оттока секрета), кальцинаты (камни) в ПЖ, выраженный фиброз ПЖ создают зоны персистирующей инфекции. На эффективность терапии также влияют анатомические особенности (например, увеличенный объем ПЖ) и сопутствующие заболевания (сахарный диабет, дефицит тестостерона, нейромышечная дисфункция нижних мочевых путей и тазового дна и др.)
Проблемы с соблюдением режима и длительности лечения	Короткие курсы антибиотиков (менее четырех недель) повышают риск рецидива ХБП. Пациенты нередко прекращают прием препарата при стихании симптомов
Побочные эффекты длительной терапии	Длительный прием антибиотиков при ХБП сопряжен с рисками дисбиоза, токсического влияния на печень, почки, сухожилия (особенно при приеме фторхинолонов), инфекций, вызванных условно-патогенными микроорганизмами
Игнорирование других звеньев патогенеза заболевания	Даже если бактерия уничтожена, воспаление может сохраняться из-за иммунных нарушений, нейрогенных механизмов (центральная сенситизация – «память боли» в спинном мозге), дисфункции мышц тазового дна (гипертонус нарушает микроциркуляцию), гормональных нарушений

нопрутки); нанотрубки; наноленты; наностержни; нанопроволоки;

- двумерные наночастицы, у которых имеются две структуры в нанодиапазоне: тонкие пленки нанометровой толщины;
- трехмерные (объемные) наночастицы, у которых все три размера (длина, ширина и толщина) находятся в наноинтервале (1–100 нм): молекулярные кластеры; нанокристаллы; коллоидные растворы (золи); зародышевые частицы, образующиеся в фазовых переходах первого рода (кристаллы, капли, газовые пузырьки); сферические мицеллы поверхностно-активных веществ (ПАВ). Также трехмерные наноструктуры могут включать порошки, волокнистые, многослойные и поликристаллические материалы, где структурные элементы плотно прилегают друг к другу, образуя конгломераты [17].

Последние достижения в области производства наноматериалов определили приоритетность и востребованность таких их ключевых характеристик, как размер, форма, химический состав и структурная составляющая, что предопределяет наличие в настоящее время большого количества таких материалов для решения конкретных медико-фармакологических задач [5, 6, 18]. Созданы и тестируются различные наноматериалы, которые в зависимости от физико-химических свойств, напрямую отражающих их основные характеристики и потенциал применения, наиболее часто классифи-

цируются на органические, неорганические и биологические [19, 20].

К органическим относятся наноматериалы, основу которых составляют органические соединения. Это могут быть полимерные структуры, биологические макромолекулы или супрамолекулярные комплексы, размер которых находится в нанодиапазоне (1–1000 нм и более) [21–28].

Многие исследователи относят биологические наноматериалы к органическим, в то время как другие выделяют их в отдельный класс [19, 20]. Однако, независимо от таксономических интерпретаций, в категорию биологических наносоединений (или биологических нанообъектов) входят компоненты живых систем, которые имеют линейные размеры в диапазоне 1–100 нм хотя бы в одном измерении. Это природные молекулы и надмолекулярные комплексы, формирующие структуры и молекулярные машины в клетках: белковые молекулы, молекулы дезоксирибонуклеиновой и рибонуклеиновой кислот (ДНК и РНК), полисахариды, внеклеточные образования (экзосомы), транспортные липопротеины крови, а также различные вирусы (вирионы) [29–34]. Ключевое отличие органических, в том числе биологических, наноматериалов от неорганических (металлов, оксидов, сплавов, квантовых точек и других) заключается в том, что их свойства (оптические, электронные, каталитические) сильно зависят от размера частиц, формы и взаимодействия с окружающей средой. Кроме того, в органических системах на наноуровне существенную роль играют гидрофобные и гидрофильные взаимодействия, а гидратная оболочка частиц динамически меняется в зависимости от ионного состава среды, ее водородного показателя (pH) и температуры [19, 20].

Таким образом, органические, в том числе биологические, наноматериалы – это разнообразная группа наноматериалов на основе углеродных соединений, которая включает как синтетические полимерные системы, так и сложные биологические объекты.

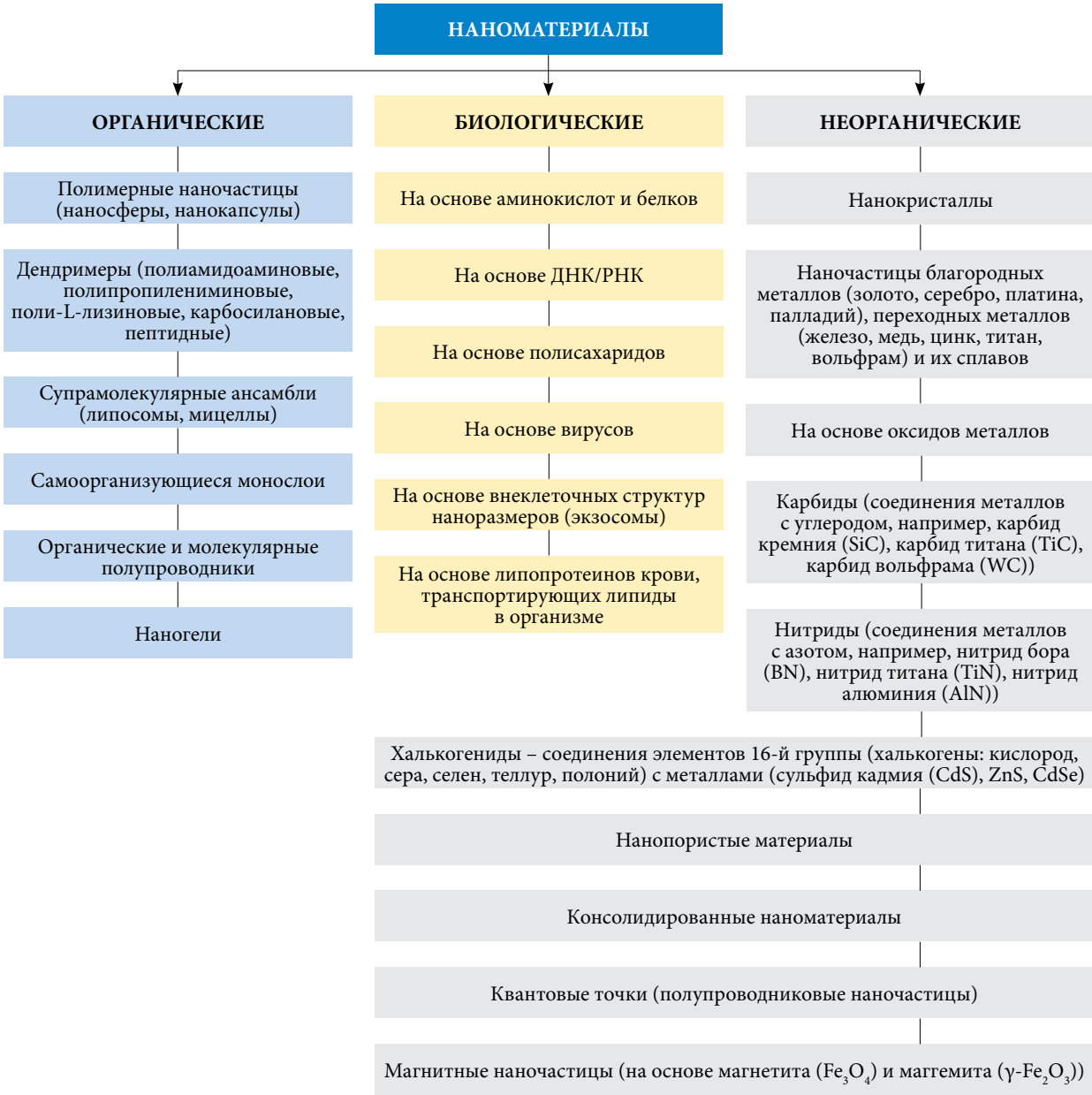
К неорганическим наноматериалам относятся неорганические вещества с размерами частиц в нанометровом диапазоне (обычно 1–100 нм), также обладающие уникальными физико-химическими свойствами, сильно зависящими от размера и формы. Базовые элементы данных материалов не углеродные соединения, в отличие от органических наноматериалов, а другие химические элементы и неорганические соединения [35]. Ключевая особенность неорганических наноматериалов – высокая удельная поверхность (площадь поверхности на единицу массы), что сильно влияет на их физико-химические свойства, благодаря чему их используют в самых разных областях (медицина, химия, электроника и оптоэлектроника, энергетика и другие) [36]. Среди тестируемых современных неорганических наноносителей лекарственных средств следует назвать нанокристаллы, наночастицы благородных и переходных металлов, их оксиды и сплавы (карбиды, нитриды, халькогениды), квантовые точки, магнитные наночастицы и другие (рисунок) [36–46].

Совершенно очевидно, что современные нанотехнологии существенно преобразили медицину, обеспечив исключительные достижения в диагностике, терапии и индивидуализированных подходах при целом ряде заболеваний, а их применение варьируется от адресной доставки лекарств до улучшения диагностической визуализации органов и тканей человеческого организма и дальнейшего развития регенеративной медицины. Однако применение медико-фармакологических нанотехнологий до сих пор сопряжено с потенциальными неблагоприятными событиями, требующими тщательной оценки. Поэтому в каждом клиническом случае необходим углубленный анализ соотношения пользы и риска, определяющий возможные преимущества и токсические эффекты применения наноразмерных систем, содержащих лекарственные средства, с учетом возможных изменений их структуры, физико-химических свойств и биологического действия (табл. 2) [47, 48].

С одной стороны, внедрение нанотехнологий в медицину и фармакотерапию ряда заболеваний человека значительно повысило точность инструментальной диагностики, биодоступность лекарственных средств и эффективность лечения конкретных заболеваний, особенно в онкологии и регенеративной медицине, поскольку наночастицы облегчают адресную доставку, снижая системную токсичность и повышая терапевтическую эффективность. С другой стороны, наноразмерные характеристики, которые делают это возможным, способны приводить к проблемам, связанным с биосовместимостью, долговременной токсичностью и активацией иммунной системы пациентов. В частности, известно, что наночастицы способны накапливаться в жизненно важных органах, вызывать окислительный стресс и быть токсичными для окружающей среды из-за их стойкости в биологических системах [49]. По мнению экспертов, несоответствия в законодательстве, дорогостоящее производство и недоверие общественности препятствуют широкому клиническому применению наномедицины, поэтому для минимизации возможного ущерба подобным научным разработкам необходимы регламентированные нормы, строгий анализ рисков и устойчивое улучшение дизайна разрабатываемых для фармакологии и медицины наночастиц [49].

Существуют критерии условно идеальной наночастицы, важные для доставки лекарств и обеспечения безопасности фармакотерапии, которые следует учитывать при разработке наномедицинских препаратов [50, 51]. Наночастицы должны:

- обладать высокой лекарственной активностью и очень низкой вероятностью немедленного высвобождения терапевтического агента;
- полностью высвобождать терапевтические агенты с оптимальной скоростью, которая зависит от дизайна рецептуры;
- иметь способность комбинироваться с лигандами для адресной доставки лекарств;



Классификация современных наноматериалов (обобщенные данные литературы [36–46])

- быть достаточно стабильными, чтобы проходить через биологические барьеры (с помощью подбора размера, контроля распределения частиц по размерам и оптимизации дзета-потенциала);
- быть биосовместимыми, биоразлагаемыми и неиммуногенными, стабильными при хранении;
- быть пригодными для использования в различных процессах производства (лиофилизация, стерилизация, сушка, смешивание, гранулирование, прессование, наполнение капсул и упаковка).

Необходимо также, чтобы:

- органические растворители и токсичные ингредиенты были исключены из производственного процесса;
- все компоненты рецептуры были безопасными, недорогими и коммерчески доступными.

Высокие биосовместимость и способность к биологическому разложению, а также неиммуногенность являются наиболее критически важными характеристиками современного «идеального наноносителя» в системах доставки лекарственных препаратов [50, 51]. Многие неорганические наноносители лекарственных средств, такие как металлы, оксиды металлов и материалы на основе углерода, с трудом поддаются разложению, что может привести к реализации их потенциальной токсичности и накоплению наноматериалов в клетках и тканях органов, подвергшихся лечению,

с неизученными последствиями, а также ограничить их клиническое применение. Органические наночастицы на основе белков, липидов или полимеров являются наиболее безопасными носителями для доставки действующего вещества в большинстве одобренных во всем мире наномедицинских препаратов благодаря их биосовместимости, отсутствию токсичности и улучшенной способности доставки, а поверхности липосом и мицелл также могут способствовать улучшению фармакокинетических характеристик данного класса препаратов [50, 51].

В настоящее время наибольший прорыв в клиническом использовании нанотехнологических систем доставки лекарственных средств наблюдается в онкологии и офтальмологии [52, 53]. Продолжается синтез и тестовые испытания различных наноносителей лекарств для применения в других областях медицины, в том числе в урологии для лечения инфекционно-воспалительных заболеваний мочевых путей и ПЖ [20, 54].

Обзор современных наноматериалов и нанотехнологий в фармакотерапии хронического простатита

Все описанные в данном разделе разработки наночастиц и нанотехнологий для оптимизации фармакотерапии хронических простатитов пока находятся на доклинических стадиях (*in vitro* или на животных) или в первой фазе клинических испытаний. Результатов крупных многоцентровых, а тем более рандомизированных контролируемых клинических исследований, которые бы однозначно подтвердили эффективность и безопасность применения лекарственных средств на различных наноносителях при хроническом простатите, в доступной современной литературе мы не обнаружили. Согласно имеющимся данным, в настоящее время нет лекарственных препаратов на основе наночастиц, официально зарегистрированных и массово назначаемых для лечения хронического простатита. Поэтому в реальной клинической практике основу медикаментозного лечения данного заболевания по-прежнему составляют традиционные фармакотерапевтические подходы, чаще всего включающие назначение антибиотиков (при ОБП и ХБП), α1-адреноблокаторов (для симптоматического улучшения мочеиспускания), нестероидных противовоспалительных средств, а также миорелаксантов, препаратов растительного происхождения, пептидных препаратов, антиоксидантов, витаминов и микроэлементов [8].

Тестируемые неорганические наночастицы

Идея использовать неорганические наночастицы металлов, их сплавов или оксидов для лечения хронического простатита оказалась очень перспективной: такие системы могут доставлять лекарства прямо в ткань ПЖ, бороться с инфекцией и уменьшать выраженность воспаления и окислительного стресса в ткани органа [38].

Таблица 2. Общая характеристика пользы и рисков применения наноразмерных лекарственных средств

Польза	Риск
Адресная доставка лекарственных агентов – ключевое преимущество. Наноразмерные системы применяются для более точной целенаправленной доставки лекарственных средств к определенным тканям и обеспечения контролируемого высвобождения действующих веществ по сравнению с традиционными лекарственными препаратами. В качестве носителей могут применяться липосомы, мицеллы, вирусы и др.	Токсичность вспомогательных веществ: носителя, ПАВ, солюбилизатора. При попадании в организм нанопрепараты могут подвергаться деградации с высвобождением непосредственно действующего вещества, материала носителя, ПАВ, солюбилизатора и других вспомогательных веществ. В некоторых случаях при разрушении наноразмерной системы вспомогательные вещества могут вызывать биологические реакции, которые не характерны для нанопрепарата, не подвергшегося деградации
Снижение системной токсичности традиционной фармакотерапии. Применение нанопрепаратов открывает широкие возможности для решения проблем, связанных с системной токсичностью традиционных лекарственных средств	Морфологические особенности наноструктур. Очень высокая удельная поверхность наноматериалов увеличивает их адсорбционную емкость, реакционную способность и каталитические свойства, что может приводить в том числе к увеличению продукции свободных радикалов и активных форм кислорода и далее к повреждению биологических структур (липиды, белки, нуклеиновые кислоты, в частности, ДНК). Различия в размерах наночастиц даже в несколько нанометров приводят к значительным изменениям реакций воспалительного и окислительного стресса
Минимизация использования вспомогательных веществ (солюбилизаторов). Разработка наносистем, содержащих химиотерапевтические агенты, позволила отказаться от применения токсичных солюбилизирующих веществ	Недостаточная эффективность. В связи с недостаточной эффективностью или тяжестью побочных эффектов были прекращены обращение и клинические испытания нескольких нанопрепаратов. Например, из пяти нанопрепаратов суперпарамагнитного оксида железа, разработанных и клинически испытанных как контрастные вещества для МРТ, только ферукарботран в настоящее время доступен в нескольких странах, а четыре остальных препарата были выведены с рынка, в том числе вследствие недостаточной диагностической ценности

В настоящее время с этой целью тестируются различные наночастицы благородных (золото, серебро, платина, палладий) и переходных (железо, медь, цинк, титан, вольфрам) металлов [20]. Это частицы размером от 1 до 100 нм, состоящие только из одного элемента (например, золота, серебра, платины, палладия, железа, меди и других) или из нескольких, например из простых оксидов (оксида цинка (ZnO), оксида титана (TiO_2), оксида алюминия (Al_2O_3), оксида магния (MgO)) или сложных (меди, циркония, церия, железа). По своим свойствам металлические наночастицы могут быть изоляторами (MgO, Al_2O_3), полупроводниками (ZnO, TiO_2, Fe_2O_3) или магнитными материалами (Fe_3O_4). Также наночастицы могут быть организованы в упорядоченные одно-, двух- и трехмерные структуры [20, 38]. Все исследования с различными неорганическими (металлическими) наночастицами остаются экспериментальными и доклиническими. Тем не менее в них показано, что неорганические наночастицы на основе металлов эффективны в борьбе с микробными инфекциями. В частности, наночастицы магнетита (Fe_3O_4) не только могут служить носителем для противовоспалительных и антибактериальных препаратов, но и сами обладают антиоксидантной и противовоспалительной активностью благодаря катализации разложения H_2O_2 в клетках и в целом характеризуются хорошей тканевой биосовместимостью [55]. Кроме того, наночастицы Fe_3O_4 способны повышать эффективность антибиотиков в борьбе с грамположительными и грамотрицательными бактериями за счет эффекта магнитного нацеливания [56, 57].

Наночастицы ZnO и золота также могут в перспективе широко использоваться для лечения воспалительных заболеваний нижних мочевыводящих путей и ПЖ, поскольку в доклинических исследованиях были доказаны их способность таргетной доставки антибиотиков в очаги воспаления, синергический эффект с антибиотиками и выраженная самостоятельная бактерицидная и антиоксидантная активность [58]. Наноразмерные частицы серебра, магния и железа также обладают антибактериальной активностью в отношении кишечной палочки и золотистого стафилококка, угнетая процессы дыхания и деления клеток микроорганизмов и приводя к их гибели [59–61]. Наночастицы меди обладают сходным антибактериальным действием при ИМП [62]. Наночастицы TiO_2 также тестировались для разрушения бактериальных клеток, при этом их антимикробная активность основана на фотокаталитических свойствах и способности вырабатывать активные формы кислорода (АФК) [63].

Разрабатываются также неорганические наноферменты с антиоксидантными свойствами, которые предполагается использовать в качестве нейропротекторных средств. Среди них наиболее перспективным является диоксид церия (CeO_2), противовоспалительные эффекты которого были описаны еще в 2009 г. [64]. В экспериментах было установлено, что данный наноноситель подавляет экспрессию индуцируемой синтазы оксида азота (NO) в макрофагах, подвергшихся воздействию бактериальных липополисахаридов, и выработку АФК в клетках, тем самым снижая выраженность воспаления и окислительного стресса и даже предотвращая развитие сепсиса [65, 66]. Таким образом, неорганические наноматериалы с ферментоподобным действием нейтрализуют свободные радикалы и оказывают противовоспалительное действие, запуская специфические ферментативные реакции в клетке.

Практическое внедрение металлических наночастиц в фармакотерапию, несмотря на приведенные выше результаты доклинических исследований, сталкивается сегодня со многими важными препятствиями на пути к одобрению Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (Food and Drug Administration, FDA), которые еще предстоит преодолеть [67]. Главные из них – потенциальная токсичность, а также неконтролируемое высвобождение и биораспределение данных частиц в тканях организма. При этом результаты анализов *in vitro* и *in vivo* не всегда коррелируют, что делает определение цитотоксичности нанометаллов дорогостоящим и трудоемким процессом [67]. Кроме того, многие металлические наночастицы (например, серебра, меди, ZnO) в организме могут дополнительно генерировать АФК, что ведет к окислительному стрессу, повреждению клеток, а в перспективе – к цитотоксичности, иммунотоксичности или даже генотоксичности [67]. Частицы не всегда остаются в целевой ткани: они могут разноситься по организму, накапливаясь в печени, почках, селезенке, а в отдельных случаях – проникать через гематоэнцефалический барьер. Проблема усугубляется тем, что метаболические пути некоторых неорганических наноматериалов в живом организме до конца не изучены, а кумулятивная токсичность при длительном применении остается высоким риском для здоровья человека [67]. Поскольку металлические наноносители – это экзогенные частицы, иммунная система может распознавать их и запускать реакцию: фагоциты пытаются их поглотить, в кровь выбрасываются воспалительные цитокины. Это не только будет снижать эффективность доставки, но и само по себе может усугублять воспалительный процесс в ПЖ [67]. Адресная доставка препаратов – еще одна проблема данного вида наночастиц: хотя они потенциально могут целенаправленно накапливаться в воспаленной ткани ПЖ, на практике распределение часто бывает неоднородным. На это влияют особенности кровоснабжения, наличие фиброзных изменений, а также то, как именно модифицирована поверхность частиц (какие лиганды присоединены для «прицеливания»). Добиться стабильного и предсказуемого накопления именно в очаге воспаления – сложная задача. Наконец, хронический простатит практически всегда имеет смешанный патогенез, в котором могут участвовать инфекционный агент, окислительный стресс, тканевая гипоксия, нарушения микроциркуляции и другие факторы, поэтому эффективная наносистема должна одновременно решать несколько задач (антимикробное, противовоспалительное действие, улучшение регенерации), что

усложняет ее дизайн и увеличивает затраты на синтез [68]. Высокая стоимость разработки рецептурных платформ с металлическими наночастицами и отсутствие одобренных FDA препаратов побудили многих ученых отказаться от доведения доклинических исследований до клинической стадии, несмотря на то что использование наночастиц оксида железа (маггемит/магнетит) в составе препаратов было одобрено FDA для диагностики онкологических заболеваний, гипертермической терапии рака и лечения анемии [68]. По этой причине многие исследовательские группы, желающие внедрить доклинические результаты в клиническую практику и фармакотерапию, перешли на изучение органических наночастиц, которые, безусловно, имеют целый ряд преимуществ перед металлическими неорганическими.

Тестируемые органические наночастицы

Наибольшим потенциалом для разработки систем доставки лекарств при хронических простатитах в настоящее время обладают органические, в том числе биологические, наночастицы [19–28]. Из органических наноносителей сегодня наиболее активно тестируются различные полимерные наночастицы – макромолекулы из природных или синтетических полимеров (полимолочной, полигликолевой кислоты, хитозана, альбумина, альгината натрия и других) с органической основной цепью и боковыми (например, полистирол, полилактид), которые самоорганизуются в наноструктуры и могут быть представлены в виде наносфер (высвобождение лекарства из них происходит по экспоненте) и нанокапсул (высвобождение происходит непрерывно в течение длительного времени) [20, 21]. Кроме того, много публикаций посвящено дендримерам (сферическим полимерным молекулам с центральным ядром, от которого отходят многочисленные ветви, имитирующие структуру ДНК) и особенно супрамолекулярным ансамблям – организованным надмолекулярным структурам, которые благодаря специфическим взаимодействиям (гидрофобным, водородным связям) формируют частицы с наноразмерными свойствами. Супрамолекулярные ансамбли представлены липосомами и мицеллами [22–24].

Наиболее разработанными наноматериалами являются липосомы – сферические везикулы, образованные одним или несколькими слоями липидов, которые окружают водную фазу. Существует два основных типа липосом: ненаправленные (пассивные) и направленные (активные). Первые обеспечивают пассивный транспорт препарата, их поверхность покрыта инертными биосовместимыми полимерами (например, полиэтиленгликолем), которые формируют защитный слой и препятствуют распознаванию препарата белками крови. Вторые обеспечивают активный транспорт путем присоединения направляющих векторных молекул (моноклональных антител, пептидов и других) к поверхности липосом [23]. Липосомы широко используют в биомедицинских исследованиях, особенно в исследованиях доставки нуклеиновых кислот и других веществ, включая эпигаллокатехин (компонент зеленого чая), дииндолилметан, β-ситостерол, кверцетин, ресвератрол, а также экстракты различных лекарственных растений. В экспериментах *in vivo* показано, что липосомальный перенос генов (в частности, гена человеческого β-дефензина 2 (hBD-2)) уменьшает повреждение слизистой оболочки мочевого пузыря, его интерстициальный отек и инфильтрацию воспалительных клеток в животных моделях ИМП, поэтому система трансфекции плазмидной ДНК гена hBD-2 с помощью липосом представляется перспективным методом антимикробной генной терапии при ИМП [23].

Полимерные мицеллы – коллоидные системы, в которых активное вещество находится в гидрофобном ядре, а поверхностный гидрофильный слой формирует устойчивую дисперсию в водной среде [24]. По сравнению с «твердыми» наночастицами полимерные мицеллы обычно высвобождают лекарство с более точным контролем. Скорость высвобождения может регулироваться за счет молекулярных взаимодействий в ядре (например, водородных связей). Мицеллярная форма также позволяет вводить гидрофобные лекарственные вещества внутривенно [24].

Наконец, есть публикации о гидрофильных наногелях, состоящих из полимеров, которые образуют трехмерную пространственную сетку, стабилизированную благодаря химическим связям или межмолекулярным взаимодействиям [27, 69, 70]. Наногели могут абсорбировать большое количество воды (до 95% от собственного объема), что позволяет включать в их состав различные молекулы: РНК, ДНК, олигонуклеотиды, низкомолекулярные терапевтические и диагностические агенты. Наногели обратимо реагируют на изменения температуры, ионной силы, pH, электрического поля и других факторов окружающей среды, что позволяет контролировать их свойства и поведение в организме [27]. При этом наногели характеризуются высокой биосовместимостью, биоразлагаемостью и способностью к образованию нанометровых соединений, поэтому сегодня активно используются в различных областях медицины [69]. Эксперименты на животных показали, что ректальная система доставки в виде наногеля HA/LF@EMO-NPs, содержащего эмодин (природное соединение с выраженными противовоспалительными, антиоксидантными и антифиброзными свойствами), хитозан, гиалуроновую кислоту и динатриевую соль β-глицерофосфата, обладает высокой адгезией, что обеспечивает эффективное удержание препарата и его медленное высвобождение и значительно снижает экспрессию воспалительных цитокинов, уровень окислительного стресса и фиброз у крыс с хроническим простатитом, а также оказывает противовоспалительное действие благодаря ингибированию сигнального пути NF-κB без явной токсичности [70].

В качестве носителей лекарственных средств, помимо наногелей, также широко используют органические наноэмульсии. Показано, что наночастицы на основе полилактид-ко-гликолида (PLGA) (биоразлагаемый полимер) проявляют отличные антибактериальные свойства в отношении патогенов уретры, доставляя

в нее триметоприм [71]. Кроме того, наночастицы PLGA в конъюгации с аутоантигенным пептидом T2 (комплекс PLGA-PEMA-T2) в моделях на 50 самцах мышей показали высокий потенциал при ХАП/СХТБ, уменьшая выраженность болевого синдрома и нарушений мочеиспускания, активируя локальный иммунный ответ ПЖ и ослабляя патологические изменения в ней. Одновременно в группе, получавшей PLGA-PEMA-T2, по сравнению с другими группами снизился уровень сывороточных медиаторов воспаления (фактора некроза опухоли α и С-реактивного белка) и повысился уровень противовоспалительного интерлейкина 10 [72].

С учетом известных сложностей проникновения в воспаленную ткань ПЖ, распределения и накопления в ней эффективных доз любых лекарственных препаратов (а не только антибиотиков) при обострении любой формы хронического простатита основной упор современные исследователи делают на решение этих проблем традиционной фармакотерапии. При ХБП данная задача стоит еще острее, поскольку неадекватная антимикробная химиотерапия закономерно ведет к усиленной селекции антибиотикорезистентных штаммов уропатогенов, склонных к формированию в ПЖ бактериальных биопленок, на которые традиционные формы доставки антимикробных химиопрепаратов вообще могут не оказывать влияния [73].

Именно органические наноносители, которые характеризуются высокой биодоступностью и, главное, биоразлагаемостью в ткани ПЖ, помогут существенно и безопасно повысить эффективность фармакотерапии любой формы хронического простатита. Тем более что краткосрочная и особенно долгосрочная безопасность при накоплении в ПЖ металлических наночастиц (неорганических наноносителей) остается неизученной в современной биомедицине: имеются главным образом данные, полученные на клеточных культурах и в экспериментах на животных, которые не всегда отражают процессы в живом организме. В настоящее время в доклинических исследованиях тестируются различные органические биоразлагаемые системы доставки антибиотиков в ПЖ (на основе полимерных наночастиц, хитозана, сополимеров молочной и гликолевой кислот, гиалуроновой и феруловой кислот, альбумина, аргинина и других), но их настолько много, что описать все в данном обзоре не представляется возможным [74–80].

Тестируемые биологические наночастицы

В последние годы в биомедицине стали широко разрабатывать и использовать различные наноматериалы биологического происхождения [29–34]. Однако для потенциального применения в фармакотерапии хронического простатита тестируются лишь очень немногие из них, в частности, внеклеточные везикулы (экзосомы, микровезикулы (эктосомы) и апоптотические тельца) – мембранные пузырьки (участки) двойного фосфолипидного слоя клеточных мембран, высвобождаемые различными типами клеток во внешнюю среду [81, 82].

Внеклеточные везикулы выступают как универсальный механизм межклеточной коммуникации и передачи информации. С их помощью клетки могут обмениваться сигналами, регулировать иммунные ответы, влиять на процессы развития, регенерации тканей и другие. Эти частицы также играют важную роль в регуляции воспалительных и иммунных процессов в организме. В частности, показано, что экзосомы, нагруженные берберином, оказывают противовоспалительное действие: снижают экспрессию маркера провоспалительного фенотипа M1 (iNOS, а также CD86) и повышают экспрессию маркера противовоспалительного фенотипа M2 (CD206), а также уменьшают уровни провоспалительных цитокинов (фактора некроза опухоли α, интерлейкина 1β и интерлейкина 6) [83]. В экспериментальной модели хронического простатита внеклеточные везикулы, выделяемые мезенхимальными стволовыми клетками, также подавляли иммуновоспалительные процессы в ПЖ путем снижения избыточной экспрессии циклооксигеназы 2 и восстановления баланса клеток Th1/Th2 и Treg/Th17 и улучшали процессы регенерации тканей ПЖ после перенесенного воспаления, что в перспективе может стать эффективной клинической опцией в фармакотерапии хронических простатитов независимо от их категории [84]. В одном из экспериментальных исследований изучали, как наночастицы с разными физико-химическими свойствами нацеливаются на воспаленные ткани ПЖ [76]. Авторы сравнивали наночастицы трех размеров (150–160, 180–190 и > 220 нм), модифицированные двумя разными лигандами – фолиевой кислотой и циклическим пептидом cRGD с замкнутой последовательностью аминокислот (Arg-Gly-Asp), которая повышает его стабильность в физиологических условиях по сравнению с линейной формой (RGD), а также два способа их введения экспериментальным животным: внутривенную инъекцию в хвост и уретральную инъекцию. Наилучшая эффективность нацеливания была достигнута с модифицированными фолиевой кислотой наночастицами размером 180–190 нм при внутривенной инъекции в хвост. Эти наночастицы при данном пути введения дольше циркулируют в крови, сильнее накапливаются в тканях ПЖ, в том числе в просвете желез, превосходят по способности проникать в ткани ПЖ наночастицы, модифицированные пептидом cRGD, показывают более высокую флуоресцентную интенсивность по сравнению с наночастицами других размеров и немодифицированными частицами. При этом крупные наночастицы (> 220 нм) быстрее выводятся из организма – их почти не обнаружили в тканях через 48 часов. Уретральная инъекция оказалась менее эффективной, чем внутривенная: флуоресцентный сигнал был значительно слабее [76].

Таким образом, несмотря на перспективность систем доставки лекарств в ПЖ на основе биологических наноматериалов, их клиническое внедрение, как и в случае других классов наноматериалов, сопряжено со сложностями: недостаточной оценкой безопасности и фармакокинетики, невозможностью точной стандартизации и отсутствием крупных клинических исследований с высоким уровнем доказательности.

Обсуждение

Большое количество публикаций по теме нанотехнологий и наноматериалов в медицине, обнаруженных в базах научных данных только за 2020–2026 гг., подчеркивает безусловную приоритетность данного направления для науки и практики во всем мире [1–7]. Внедрение нанотехнологий и наноматериалов в современную медицину и фармакологию позволило совершить прорыв в медицинской визуализации, регенеративной медицине и активно разрабатывать и внедрять методы таргетной доставки лекарственных средств в органы и ткани при лечении различных заболеваний человека, как это уже делается, в частности, в онкологии [1–7].

Трудности традиционной фармакотерапии хронических простатитов в урологической практике хорошо известны, а ее результаты, несмотря на применение актуальных и эффективных препаратов, в ряде случаев остаются неудовлетворительными [10–12]. Уникальные и сложные анатомо-физиологические особенности ПЖ, особенно ее хроническая воспалительная микросреда (венозная конгестия, микроциркуляторные нарушения на фоне воспалительного отека, гипоксия, ацидоз, окислительный стресс и др.), создают серьезные препятствия для эффективной доставки традиционных лекарств, которые не способны преодолеть тканевые барьеры, полноценно воздействовать на очаг воспаления и бактериальные биопленки и, соответственно, обеспечить удовлетворительные краткосрочные и долгосрочные результаты терапии [13–15]. Наноразмерные системы доставки лекарств, отличающиеся настраиваемыми физико-химическими свойствами, улучшенным проникновением в ткани ПЖ и контролируемым высвобождением в них, а также интеллектуальной адаптивностью, представляют собой инновационные решения для преодоления этих препятствий.

В настоящее время разрабатывается и исследуется большое количество различных наночастиц (наносителей), которые могут быть органическими [21–28], биологическими [29–34] или неорганическими [36–46] и позволяют таргетно и эффективно транспортировать в ПЖ различные препараты, обеспечивающие антибактериальный, противовоспалительный, антиоксидантный и многофункциональный синергетический эффекты. Это дает возможность эффективнее воздействовать на различные патологические стадии процесса и достигать высоких концентраций лекарств в тканях органа, тем самым улучшая фармакотерапевтические результаты.

Некоторые наноматериалы могут сами модулировать локальный иммунный ответ в ПЖ, обеспечивая противовоспалительный эффект, а неорганические наночастицы на основе металлов (серебра, меди, ZnO или золота) обладают дополнительной антимикробной активностью, приводя к нарушению целостности бактериальных мембран, генерированию АФК, взаимодействуя с ДНК микробов, ингибируя образование микробных биопленок или разрушая их внеклеточный матрикс, что критически важно для лечения инфекционных форм хронического простатита [36–46]. Однако для неорганических наноносителей на основе металлов, их оксидов или сплавов краеугольным камнем остаются вопросы безопасного применения (металлы токсичны и не разлагаются в тканях), а последствия накопления металлических наночастиц в ПЖ в краткосрочной, а тем более в долгосрочной перспективе остаются неизученными [50, 51, 67, 68]. Поэтому в последнее время интерес исследователей прикован к разработке органических наноносителей для создания систем доставки лекарственных средств (прежде всего, антибиотиков) в ткань ПЖ, которые являются, в отличие от неорганических наноматериалов, гипоиммунными, биосовместимыми и, самое главное, биоразлагаемыми материалами [72–80]. Также продолжается экспериментальное тестирование некоторых биологических наноносителей для создания систем таргетной доставки лекарственных препаратов в ткань ПЖ [81–84].

К сожалению, на сегодняшний день практически все разработки наноматериалов различных классов для лечения хронического простатита находятся на доклинических или ранних клинических стадиях: проводятся исследования в культурах клеток и экспериментах на животных, а также небольшие неконтролируемые клинические эксперименты. Кроме того, существует ряд нерешенных проблем, связанных с безопасностью, биосовместимостью, последствиями накопления транспортных наночастиц в ткани ПЖ при проведении длительных курсов фармакотерапии, а также со сложностями стандартизации и с последующей клинической валидацией.

Заключение

Научная история создания и исследования наноматериалов – это история перехода от интуитивного использования свойств наномира к целенаправленному созданию материалов с заданными нанохарактеристиками на основе фундаментальных открытий в физике, химии и биологии. В настоящее время разработано и тестируется значительное количество наноматериалов, применение которых в медицине позволяет существенно улучшить медицинскую визуализацию и обеспечить таргетную доставку различных лекарственных препаратов непосредственно в очаги поражения органов с минимальным негативным влиянием на соседние клетки и ткани. Среди органов-мишеней ПЖ занимает особое место, так как ее сложнейшая анатомо-функциональная организация существенно затрудняет поступление в нее традиционных форм лекарственных препаратов, что диктует насущную необходимость проведения активной научно-исследовательской работы в данном направлении.

Для потенциального применения при лечении хронических простатитов разрабатываются и тестируются различные классы наночастиц (неорганические, органические, биологические), каждый из которых имеет

свои преимущества и недостатки, которые предстоит использовать или преодолевать соответственно и которые в подавляющем большинстве пока изучены только в доклинических или очень небольших неконтролируемых клинических исследованиях. В настоящее время в урологической практике нет наноразмерных лекарственных препаратов, официально зарегистрированных и разрешенных для фармакотерапии хронических простатитов, однако их появления, вероятно, стоит ожидать в обозримом будущем. Наночастицы имеют высокий фармакотерапевтический потенциал, поэтому крайне нужны крупные многоцентровые высокодоказательные клинические исследования, чтобы подтвердить эффективность и оценить кратко- и долгосрочную безопасность тестируемых наноразмерных лекарственных средств для лечения хронического простатита и обеспечить более быстрое внедрение их в рутинную урологическую практику.

Литература

1. Hassan S.A., Almaliki M.N., Hussein Z.A., et al. Development of nanotechnology by artificial intelligence: a comprehensive review. Nanostruct. 2023; 13 (4): 915–932.
2. Bayda S., Adeel M., Tuccinardi T., et al. The history of nanoscience and nanotechnology: from chemical-physical applications to nanomedicine. Molecules. 2020; 25 (1): 112.
3. Jangid H., Singh S., Kashyap P., et al. Advancing biomedical applications: an in-depth analysis of silver nanoparticles in antimicrobial, anticancer, and wound healing roles. Front. Pharmacol. 2024; 15: 1438227.
4. Lai J., Luo Z., Chen L., Wu Z. Advances in nanotechnology-based targeted-contrast agents for computed tomography and magnetic resonance. Sci. Prog. 2024; 107 (1): 368504241228076.
5. Farrokhi M., Taheri F., Farrokhi M., et al. Academic textbook: nanomedicine: technologies and applications. Kindle. 2024; 4 (1): 1–196.
6. Joseph T.M., Kar Mahapatra D., Esmaeili A., et al. Nanoparticles: taking a unique position in medicine. Nanomater. 2023; 13 (3): 574.
7. Vandghanooni S., Jaymand M., Eskandani M. The use of nanomedicines in the healthcare systems: a policy brief. Drug Dev. Ind. Pharm. 2025; 51 (6): 523–533.
8. Yebes A., Toribio-Vazquez C., Martinez-Perez S., et al. Prostatitis: a review. Curr. Urol. Rep. 2023; 24 (5): 241–251.
9. Balagobi B., Sarma S.T., Gobishangar S., et al. Prostatitis: current perspective on diagnosis and management. Sri Lanka J. Surg. 2023; 41 (1): 36–42.
10. Тюзиков И.А., Греков Е.А. Хронический простатит/синдром хронической тазовой боли: современные тренды и перспективы лечения с позиций доказательной медицины. Экспериментальная и клиническая урология. 2022; 15 (1): 90–100.
11. Kranz J., Cai T., Geerlings S., et al. European Association of Urology Guidelines on urological infections: summary of the 2026 Guidelines. Eur. Urol. 2026; 90 (4): 413–429.
12. Engeler D., Baranowski A.P., Berghmans B., et al. EAU Guidelines on Chronic Pelvic Pain. European Association of Urology; 2026.
13. Nugraha I.S., Sangkai J.M. The effectiveness of multimodal treatment strategies (antibiotics, anti-inflammatory drugs, and lifestyle modifications) in reducing prostatitis symptoms: a systematic review. Int. J. Med. Sci. Health Res. 2025; 15 (4): 1–41.
14. Borgert B.J., Wallen E.M., Pham M.N. Prostatitis: a review. JAMA. 2025; 334 (11): 1003–1013.
15. Başaranoğlu M., Özdeş A.A., Sesli M., Akbay E. Evidence-based treatment ladder for chronic prostatitis/chronic pelvic pain. Prostate. 2026; 86 (5): 550–560.
16. Borowska M., Jankowski K. Basic and advanced spectrometric methods for complete nanoparticles characterization in bio/eco systems: current status and future prospects. Anal. Bioanal. Chem. 2023; 415 (18): 4023–4038.
17. Лемешевская Е.П., Куренкова Г.В., Жукова Е.В. Наночастицы и нанотехнологии в гигиенической науке и практике. Иркутск: ИГМУ, 2024.
18. Кричевский Г.Е. Нанотехнологии в современной медицине. Наноиндустрия. 2023; 16 (6): 328–336.
19. Dakal T.C., Bhushan R., Dhakar R., et al. Classification and applications of bio-nanomaterials. In: Sharma N., Sharma R., Dakal T., eds. Bio-nanomaterials in environmental remediation: industrial applications. 2025: 47–73.
20. Xue X., Ding G., Liu T., et al. Nanoparticulate drug delivery systems in prostatitis treatment: classification and therapeutic advances. Chinese Chem. Letters. 2026 June 23: 113109. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001841726007527 (дата обращения: 25.08.2026).
21. Eltaib L. Polymeric nanoparticles in targeted drug delivery: unveiling the impact of polymer characterization and fabrication. Polymers. 2025; 17 (7): 833.
22. Zorab M.M., Qadir A.M., Ahmed A.M.A. Dendrimers as drug delivery vehicles: a comprehensive review. Cell. Mol. Biol. 2025; 71 (1): 1–12.
23. Zhang X., Liu W., Chu H., et al. Liposomes: a breakthrough in advanced drug delivery systems. Adv. Colloid Interface Sci. 2026; 353: 103887.
24. Salah Othman R., Zarei S., Rezaei Haghighat H., et al. Recent advances in smart polymeric micelles for targeted drug delivery. Polymers Adv. Technol. 2025; 36 (4): e70180.

25. Braunger M.L., Assunção da Silva E., Fernandes J.D., et al. From supramolecular order to device performance in Langmuir–Blodgett and Langmuir–Schaefer films. Chem. NanoMat. 2026; 12 (5): e202500766.
26. Chen J., Zhang W., Wang L., et al. Recent research progress of organic small-molecule semiconductors with high electron mobilities. Adv. Mater. 2023; 35 (11): 2210772.
27. Gupta J., Sharma G. Nanogel: a versatile drug delivery system for the treatment of various diseases and their future perspective. Drug Deliv. Transl. Res. 2025; 15 (2): 455–482.
28. Niknam Z., Zadeh F.H., Toosi S., et al. Organic-based nanomaterials for regenerative medicine. In: Handbook of Nanomaterials. Elsevier, 2024; 2: 359–400.
29. Malik S., Muhammad K., Waheed Y. Emerging applications of nanotechnology in healthcare and medicine. Molecules. 2023; 28 (18): 6624.
30. Panda P., Mohapatra R. Advancements in DNA nanotechnology for targeted drug delivery: design strategies and applications. Hybrid. Adv. 2025; 10: 100480.
31. Vardhan J., Yadav S., Naik Bukke S.P., et al. A review of methods of enhancing polysaccharides for drug delivery applications. Nat. Prod. Commun. (NPC). 2025; 20 (12): 1934578X251407010.
32. Atabi F., Moassesfar M., Bagherian M., et al. Exosomal nanocarriers for targeted drug delivery in cancer therapy. Discov. Oncol. 2026; 17 (1): 496.
33. He Y., Yin N., Zhang Z., et al. Strategies for engineering biomimetic lipoproteins to improve drug delivery efficiency and tumor therapy. Drug Deliv. Transl. Res. 2026 May 29. URL: https://doi.org/10.1007/s13346-026-02160-3 (дата обращения: 25.08.2026).
34. Haleem A., Javaid M., Singh R.P., et al. Applications of nanotechnology in medical field: a brief review. Global Health J. 2023; 7 (2): 70–77.
35. Мацакова Е.Г., Симакова Д.И. Наночастицы, проявляющие антибактериальные эффекты: свойства, получение, механизм действия, применение. Российские нанотехнологии. 2020; 15 (2): 238–243.
36. Chen W., Huang J., Guo Y., et al. Nanocrystals for intravenous drug delivery: composition development, preparation methods and applications in oncology. AAPS PharmSciTech. 2025; 26 (3): 66.
37. Owusu E., Lerma S., Jang J., et al. Nanodiamonds in advancing biomedical sciences. ACS Appl. Mater. Interfaces. 2025; 17 (52): 70311–70334.
38. Wang X., Shu C., Wang G., et al. Recent progress of noble metal-based nanozymes: structural engineering and biomedical applications. Nanoscale. 2025; 17 (17): 10557–10580.
39. Ghazi R., Ibrahim T.K., Nasir J.A., et al. Iron oxide based magnetic nanoparticles for hyperthermia, MRI and drug delivery applications: a review. RSC Adv. 2025; 15 (15): 11587–11616.
40. Elahi N., Zeinalipour-Yazdi C.D. Advances in the synthesis of carbon nanomaterials towards their application in biomedical engineering and medicine. C. 2025; 11 (2): 35.
41. Du X., Lee S.S., Blugan G., Ferguson S.J. Silicon nitride as a biomedical material: an overview. Int. J. Mol. Sci. 2022; 23 (12): 6551.
42. Senthamil C., Hemalatha J., Nandhabala S., et al. Multifunctionalized metal chalcogenides and their roles in catalysis and biomedical applications. Chem. Select. 2022; 7 (46): e202203394.
43. Hadden M., Martinez-Martin D., Yong K.T., et al. Recent advancements in the fabrication of functional nanoporous materials and their biomedical applications. Materials (Basel). 2022; 15 (6): 2111.
44. Peng Y., Yang Z., Sun H., et al. Nanomaterials in medicine: understanding cellular uptake, localization, and retention for enhanced disease diagnosis and therapy. Aging Dis. 2024; 16 (1): 168–208.
45. Jain N.S., Somanna P., Patil A.B. Application of quantum dots in drug delivery. Nanosci. Nanotechnol. Asia. 2022; 12 (1): 16–31.
46. Comanescu C. Magnetic nanoparticles: current advances in nanomedicine, drug delivery and MRI. Chem. 2022; 4 (3): 872–930.
47. Ma X., Tian Y., Yang R., et al. Nanotechnology in healthcare, and its safety and environmental risks. J. Nanobiotechnology. 2024; 22 (1): 715.
48. Singh V., Verma A., Chouhan A.P.S., et al. Safety and toxicity of nanomaterials in medicine. In: Prabhakar P.K., Prakash A., eds. Cutting-Edge Applications of Nanomaterials in Biomedical Sciences. IGI Global Scientific Publishing, 2024: 429–449.
49. Fortune A., Aime A., Raymond D., Kumar S. Nanotechnology in medicine: a double-edged sword for health outcomes. Health Nanotech. 2025; 1 (1): 9.
50. Aminu N., Bello I., Umar N.M., et al. The influence of nanoparticulate drug delivery systems in drug therapy. J. Drug Deliv. Sci. Technol. 2020; 60: 101961.
51. Halwani A.A. Development of pharmaceutical nanomedicines: from the bench to the market. Pharmaceutics. 2022; 14 (1): 106.
52. Li B., Shao H., Gao L., et al. Nano-drug co-delivery system of natural active ingredients and chemotherapy drugs for cancer treatment: a review. Drug Deliv. 2022; 29 (1): 2130–2161.
53. Lin X., Zhou Y., Lv K., et al. Nanomedicine-based ophthalmic drug delivery systems for the treatment of ocular diseases. Int. J. Nanomedicine. 2025; 20: 9221–9249.

54. Ниткин Д.М. Липосомальные нанотехнологии в лечении заболеваний предстательной железы. Репродуктивное здоровье. Восточная Европа. 2025; 15 (1): 66–74.
55. Шевченко О.В., Медков М.А., Апанасевич В.И., Лукьянов П.А. Обзор по контрастным гибридным наноразмерным препаратам на основе тантала, висмута и железа для диагностики и терапии рака. Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2020; 2 (210): 97–102.
56. Han H., Sohn B., Choi J., Jeon S. Recent advances in magnetic nanoparticle-based microfluidic devices for the pretreatment of pathogenic bacteria. Biomed. Eng. Lett. 2021; 11 (4): 297–307.
57. Alphandéry E. Iron oxide nanoparticles for therapeutic applications. Drug Discov. Today. 2020; 25 (1): 141–149.
58. Abd Elkodous M., El-Sayyad G.S., Abdel Maksoud M.I.A., et al. Fabrication of ultra-pure anisotropic zinc oxide nanoparticles via simple and cost-effective route: Implications for UTI and EAC medications. Biol. Trace Elem. Res. 2020; 196 (1): 297–317.
59. Videira-Quintela D., Guillén F., Montalvo G., Martin O. Silver, copper, and copper hydroxy salt decorated fumed silica hybrid composites as antibacterial agents. Colloids Surf. B. Biointerfaces. 2020; 195: 111216.
60. Stabryla L.M., Johnston K.A., Diemler N.A., et al. Role of bacterial motility in differential resistance mechanisms of silver nanoparticles and silver ions. Nat. Nanotechnol. 2021; 16 (9): 996–1003.
61. Panáček D., Hochvaldová L., Bakandritsos A., et al. Microbial resistance: silver covalently bound to cyanographene overcomes bacterial resistance to silver nanoparticles and antibiotics. Adv. Sci. (Weinh.). 2021; 8 (12): 2003090.
62. Wu S., Rajeshkumar S., Madasamy M., Mahendran V. Green synthesis of copper nanoparticles using Cissus vitiginea and its antioxidant and antibacterial activity against urinary tract infection pathogens. Artif. Cells Nanomed. Biotechnol. 2020; 48 (1): 1153–1158.
63. Ocampo R.A., Echeverria F.E. Antibacterial and biological behavior of TiO2 nanotubes produced by anodizing technique. Crit. Rev. Biomed. Eng. 2021; 49 (1): 51–65.
64. Othman A., Gowda A., Andreescu D., et al. Two decades of ceria nanoparticle research: structure, properties and emerging applications. Mater. Horiz. 2024; 11 (14): 3213–3266.
65. Assis M.B.D.S., De Moraes G.N., De Souza K.R. Cerium oxide nanoparticles: chemical properties, biological effects and potential therapeutic opportunities. Biomed. Rep. 2024; 20 (3): 48.
66. Maddheshiya S., Rajwani P., Praharaj C., et al. Recent advances in the diagnostic and therapeutic applications of Ceria Nanozymes. Nanomedicine (Lond.). 2026; 21 (8): 1157–1177.
67. Liu C.P., Chen Z.D., Ye Z.Y., et al. Therapeutic applications of functional nanomaterials for prostatitis. Front. Pharmacol. 2021; 12: 685465.
68. Materón E.M., Miyazaki C.M., Carr O., et al. Magnetic nanoparticles in biomedical applications: a review. Appl. Surf. Sci. Adv. 2021; 6: 100163.
69. Fuchs S., Shariati K., Ma M. Specialty tough hydrogels and their biomedical applications. Adv. Healthc. Mater. 2020; 9 (2): e1901396.
70. Ye Y., Zhong W., Luo R., et al. Thermosensitive hydrogel with emodin-loaded triple-targeted nanoparticles for a rectal drug delivery system in the treatment of chronic non-bacterial prostatitis. J. Nanobiotechnology. 2024; 22 (1): 33.
71. Brauner B., Semmler J., Rauch D., et al. Trimethoprim-loaded PLGA nanoparticles grafted with WGA as potential intravesical therapy of urinary tract infections – studies on adhesion to SV-HUCs under varying time, pH, and drug-loading conditions. ACS Omega. 2020; (28): 17377–17384.
72. Cao Y., Cheng Y., Ihsan A.U., et al. A Nanoparticle-coupled T2 peptide induces immune tolerance and ameliorates Chronic Prostatitis/Chronic Pelvic Pain Syndrome (CP/CPPS) in mice model. Fundam. Clin. Pharmacol. 2019; 33 (3): 267–276.
73. Vestby L.K., Grønseth T., Simm R., Nesse L.L. Bacterial biofilm and its role in the pathogenesis of disease. Antibiotics (Basel). 2020; 9 (2): 59.
74. Yayehrad A.T., Wondie G.B., Marew T. Different nanotechnology approaches for ciprofloxacin delivery against multidrug-resistant microbes. Infect. Drug Resist. 2022; 15: 413–426.
75. Maurizi L., Forte J., Ammendolia M.G., et al. Effect of ciprofloxacin-loaded niosomes on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* biofilm formation. Pharmaceutics. 2022; 14 (12): 2662.
76. Hu R., Yang Y., Song G., et al. *In vivo* targeting capacities of different nanoparticles to prostate tissues based on a mouse model of chronic bacterial prostatitis. Front. Bioeng. Biotechnol. 2022; 10: 1021385.
77. Gao Y., Liu K., Zhang Y., et al. Hyaluronic acid-modified curcumin-copper complex nano delivery system for rapid healing of bacterial prostatitis. Carbohydr. Polym. 2023; 310: 120668.
78. Yassin A.E., Albekairy A.M., Omer M.E., et al. Chitosan-coated azithromycin/ciprofloxacin-loaded polycaprolactone nanoparticles: a characterization and potency study. Nanotechnol. Sci. Appl. 2023; 16: 59–72.
79. Mohammad S.I., Aldosari B.N., Mehanni M.M., et al. Fabrication and application of targeted ciprofloxacin nanocarriers for the treatment of chronic bacterial prostatitis. Int. J. Pharm. X. 2024; 7: 100247.
80. Chen B., Wang L., Xie R., et al. Inflammation-targeted and antioxidative poly(ferulic acid) nanoparticles directly treat chronic nonbacterial prostatitis via inhibiting pyroptosis by disrupting Nrf2/KEAP1 multimer formation and as a robust drug carrier. Adv. Healthc. Mater. 2025; 14 (18): e2500954.
81. Wang K., Ye H., Zhang X., et al. An exosome-like programmable-bioactivating paclitaxel prodrug nanoplatform for enhanced breast cancer metastasis inhibition. Biomater. 2020; 257: 120224.

82. Jiang L., Zhu Y., Luan P., et al. Bacteria-anchoring hybrid liposome capable of absorbing multiple toxins for antivirulence therapy of *Escherichia coli* infection. ACS Nano. 2021; 15 (3): 4173–4185.
83. Gao Z.-S., Zhang C.-J., Xia N., et al. Berberine-loaded M2 macrophage-derived exosomes for spinal cord injury therapy. Acta Biomater. 2021; 126: 211–223.
84. Peng X., Guo H., Yuan J., et al. Extracellular vesicles released from hiPSC-derived MSCs attenuate chronic prostatitis/chronic pelvic pain syndrome in rats by immunoregulation. Stem Cell Res. Ther. 2021; 12 (1): 198.

Modern Nanotechnologies in the Pharmacotherapy of Chronic Prostatitis

I.A. Tyuzikov, PhD[1], E.A. Grekov[2], A.V. Smirnov[3]

[1] *Tandem Plus Medical Center, Yaroslavl*
[2] *Hormone Life Clinic, Moscow*
[3] *City Clinical Hospital No. 31, St. Petersburg*

Contact person: Igor A. Tyuzikov, phoenix-67@list.ru

Chronic prostatitis is one of the most frequently diagnosed diseases in men of various ages. However, the results of its traditional pharmacotherapy in a number of cases remain unsatisfactory, which is due to its complex multifactorial pathogenesis and the anatomical and physiological characteristics of the prostate gland in normal conditions and in cases of chronic inflammation, which significantly hinder the penetration, distribution, and accumulation of high-dose medications in the organ's tissue. At the same time, the introduction of nanotechnology into certain areas of medicine and pharmacology makes it possible today to create special systems for targeted (purposeful) delivery of medications to various tissues based on various nanocarriers (nanoparticles), which make it possible to overcome the aforementioned problems.

Aim. *Based on the results of modern investigations, to study current developments in nanomaterials for creating targeted nanoscale medicinal preparations delivery systems to the prostate gland and the prospects for their clinical implementation to optimize pharmacotherapy for chronic inflammatory diseases of the prostate gland (chronic prostatitis).*

Key points. *In chronic prostatitis, traditional pharmacotherapy is often ineffective: the complex anatomy of the organ and the inflammatory microenvironment of the prostate (venous congestion, microcirculatory disorders, hypoxia, oxidative stress, etc.) prevent medications from reaching the site of inflammation and affecting the mechanisms of its development and maintenance, as well as infectious agents and bacterial biofilms. Nanoscale delivery systems overcome these barriers due to improved tissue penetration, controlled release, and adaptability. Currently, organic, biological, and inorganic nanocarriers of medicinal agents have been developed and are being tested for the pharmacotherapy of chronic prostatitis. To study them, a search was conducted for full-text publications in any language for the period 2020–2026 in the databases PubMed and Google Scholar using the key search words 'chronic prostatitis', 'nanomaterials', 'nanoparticles', 'treatment of chronic prostatitis', 'nanoparticles in the treatment of chronic prostatitis', of which 84 were included in the analytical part of the review.*

Various inorganic nanoparticles (metals, their alloys, or oxides) are not only capable of targeted delivery of medications to the prostate gland but also have their own antibacterial, anti-inflammatory, and antioxidant effects and are capable of destroying microbial biofilms. However, inorganic carriers have the problem of toxicity, potential interactions, accumulation, and long-term persistence in prostate tissue, with practically unstudied short- and long-term consequences for its safety. Therefore, organic nanocarriers that are hypoallergic, biocompatible, and biodegradable in terms of their characteristics are now being developed more actively. However, despite the large number of nanocarriers proposed for potential use in chronic prostatitis, the vast majority of developments are currently in the preclinical or early clinical stages, and the key unresolved challenges remain the difficulties of standardizing the properties of nanoparticles (size, shape, coating) and their clinical validation.

Conclusion. *Despite the fact that there are currently no nanoscale medicinal products officially registered and approved for the pharmacotherapy of chronic prostatitis in urological practice, this scientific and practical area has enormous pharmacotherapeutic potential. Therefore, further large-scale multicenter high-evidence clinical studies are needed to confirm the efficacy and to assess the short- and long-term safety of the tested nanoscale medicinal products for the treatment of chronic prostatitis, and to introduce them into routine urological practice more quickly.*

Keywords: *chronic prostatitis, nanotechnology, nanoparticles, drug delivery systems, nanoscale medicinal products, pharmacotherapy*