

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 544.77+546.05

ЗЕЛЕНый СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ

Татьяна Игоревна Шабатина^{1,2}, Аниндья Бозе³, Яна Андреевна Громова¹,
Ольга Ивановна Верная^{1,2}, Михаил Яковлевич Мельников¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
химический факультет

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

³ Department of Pharmaceutical Analysis, School of Pharmaceutical Sciences
Siksha O Anusandhan (Deemed to be University)

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Игоревна Шабатина,
tatyanaashabatina@yandex.ru

Аннотация. Последнее десятилетие в науке прослеживается тенденция на внедрение зеленых технологий получения различных материалов, в том числе и синтеза наночастиц металлов. Разработка таких методов синтеза, где используются не токсичные вещества, а различные растительные экстракты и микроорганизмы, становится все более актуальной. В обзоре рассмотрены современные методы зеленой химии, лежащие в основе получения и стабилизации металлических наночастиц золота, серебра, меди, платины и палладия. Кроме того, в обзоре описаны практические приложения использования различных наночастиц металлов, в том числе в области медицины для диагностики и терапии различных заболеваний.

Ключевые слова: наночастицы металлов, зеленая химия, зеленый синтез, растительные экстракты, области применения, биомедицина

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2026-67-1-3-27

Финансирование. Работа выполнена по теме № АААА-А21-121011590090-7 государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 25-43-01023).

Для цитирования: Шабатина Т.И., Бозе А., Громова Я.А., Верная О.И., Мельников М.Я. Зеленый синтез наночастиц металлов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2026. Т. 67. № 1. С. 3–27.

Сокращения (аббревиатуры): НЧ – наночастицы, НЧМ – наночастицы металлов, AgНЧ – наночастицы серебра, AuНЧ – наночастицы золота, ППР – поверхностный плазмонный резонанс, ПЭМ – просвечивающая электронная микроскопия, CuНЧ – наночастицы меди, PtНЧ – наночастицы платины, PdНЧ – наночастицы палладия.

SCIENTIFIC REVIEW

GREEN SYNTHESIS OF METAL NANOPARTICLES

Tatyana I. Shabatina^{1,2}, A. Bose³, Yana A. Gromova¹, Olga I. Vernaya^{1,2},
Mikhail Ya. Melnikov¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry

² Bauman Moscow State Technical University, faculty of fundamental sciences

³ Department of Pharmaceutical Analysis, School of Pharmaceutical Sciences Siksha O Anusandhan (Deemed to be University)

Corresponding author: Tatyana I. Shabatina, tatyashabatina@yandex.ru

Abstract. Nanoscale materials are unique research objects which attract growing attention due to their special physical and chemical properties and a wide range of applications. The last decade in science there is a trend towards the introduction of «green technologies» for production of various materials, including metal nanoparticles. The development of synthesis methods that do not use toxic substances and involve the use of various plant extracts and microorganisms is becoming increasingly important. This review discusses the current and modern methods of green chemistry underlying the production of several metal nanoparticles: gold, silver, copper, platinum, and palladium nanoparticles. In addition, the review describes the practical applications of various metal nanoparticles, including in the field of medicine for diagnosis and therapy of various diseases.

Keywords: metal nanoparticles, green chemistry, green synthesis, natural extracts, applications, biomedicine

Financial Support. The work was conducted within the framework of the state assignment of Lomonosov Moscow State University, theme No. AAAA-A21-121011590090-7. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 25-43-01023).

For citation: Shabatina T.I., Bose A., Gromova Ya.A., Vernaya O.I., Melnikov M.Y. Green synthesis of metals nanoparticles // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. 2026. T. 67. № 1. S. 3–27.

1. Введение

Наночастицы (НЧ) – частицы, размер которых находится в диапазоне 1–100 нм. Они обладают уникальными физико-химическими свойствами благодаря своему малому размеру, значительной площади поверхности и более высокой реакционной способности по сравнению с объемными материалами.

В последние годы разработка методов синтеза новых веществ и материалов, которые позволяют исключить из лабораторных синтезов и технологических процессов использование опасных химикатов и токсичных растворителей, становится все более важной задачей [1, 2]. Химический синтез НЧ металлов (НЧМ) может оказывать вредное воздействие как на живые организмы, так и на окружающую природу. Физические и химические методы, используемые при получении неорганических НЧ, несут в себе много рисков для окру-

жающей среды, а также являются довольно дорогостоящими. Поэтому с 2012 г. началось развитие более экологичных методов синтеза зеленой химии (Dhillon et al., 2012) [3]. Использование экстрактов овощей, фруктов, трав, цветов и других растительных культур, а также микроорганизмов (грибы, бактерии) для методов зеленой химии является более безопасным и экономически оправданным [4]. Такие методы в производстве НЧМ значительно снижают их потенциальную опасность для здоровья человека и экосистемы. Интерес многих исследователей к методам зеленой химии для синтеза НЧМ обусловлен возможностью их применения в области медицины, а также использования на стадии диагностики широкого спектра заболеваний [3, 4]

В обзоре рассмотрены актуальные работы по методам зеленого синтеза металлических НЧ.

Обсуждены общие подходы, которые используются в зеленых методах синтеза НЧМ, а также примеры различных направлений их применения от высокоселективных каталитических систем до систем направленной доставки лекарств при лечении различных заболеваний. Обзор включает в себя 4 основных раздела: введение, основные принципы методов синтеза НЧМ (методы зеленой химии для получения НЧ Au, Ag, Pt, Pd, Cu, состав растительных экстрактов, возможные области применения НЧМ), области применения, заключение.

2. Методы синтеза наночастиц металлов

Нанообъекты, безусловно, относятся к одним из самых перспективных материалов с широким спектром применения. Поэтому исследователи уделяют большое внимание разработке новых методов их синтеза или совершенствованию существующих, что определяется конечной областью применения. НЧМ можно получать различными физическими и физико-химическими методами [5, 6]: измельчением в мельницах, лазерной абляцией массивных образцов в органических растворителях, пропусканием высокочастотного разряда сквозь слой органического растворителя, содержащего порошок металла (метод Сведберга), испарением-конденсацией, электрохимическими и фотохимическими методами. Однако перечисленные методы не позволяют получать их в достаточном объеме, а также требуют наличия значительных энергетических мощностей. Для осуществления таких технологий часто необходимо специальное оборудование, стоимость которого вносит существенный вклад в себестоимость конечного продукта. Кроме того, не все перечисленные физические методы получения НЧМ позволяют исключить использование токсичных органических растворителей и стабилизаторов.

Синтез некоторых НЧМ может быть осуществлен биологическими методами, внутри живых объектов – бактериальных клеток или грибов. В недавних исследованиях было показано, что бактерии (*Pseudomonas deptonis*, *Visella oriza*, *Bacillus methylotrophicus*, *Bhargavaea indica*, *Brevibacterium frigoritolerans*) и грибы (*Saccharomyces ellipsoideus*, *Rhizoctonia solani*, *Cladosporium cladosporioides*) способны синтезировать наночастицы серебра (AgНЧ) и наночастицы золота (AuНЧ) [7–9]. Существенным недостатком этой группы методов является то, что для их осуществления

необходимы значительные трудовые, временные и энергетические затраты, а также наличие специального оборудования для выращивания используемых биологических объектов и создания для этого оптимальных условий.

Для получения НЧМ используют различные химические методы [5, 6]. Наибольшее распространение получили методы синтеза НЧМ, основанные на химическом восстановлении ионов металлов в водном растворе и/или органическом растворителе. Эта группа методов отличается простотой и широким диапазоном возможностей для варьирования условий синтеза, позволяющим достигать желаемых характеристик НЧ с точки зрения их распределения по размерам, форме и скорости формирования. Кроме того, химические методы позволяют получать большие партии НЧМ. Восстановителями в реакциях синтеза AgНЧ служат борогидрид, аскорбат и цитрат натрия, гидразина гидрат, N, N-диметилформамид, водород. Для стабилизации и предотвращения агрегации и окисления МНЧ используют различные соединения, такие как хитозан, целлюлоза, поли-N-винил-2-пирролидон, полиэтиленгликоль, полиметакриловая кислота. Гликоли (полиолы), такие как этиленгликоль, 1,2-пропиленгликоль или 1,5-пентандиол, также активно применяют для синтеза НЧМ. Эти соединения не требуют использования дополнительных реагентов, так как совмещают функцию восстановителя и стабилизатора одновременно. Синтез НЧМ в обратных мицеллах и микроэмульсиях позволяет осуществлять контроль размера и получать НЧМ с узким распределением по размерам.

Синтез некоторых НЧМ, например AgНЧ, проводят термическим разложением их комплексных солей [10, 11]. Получение НЧМ возможно также восстановлением наночастиц оксидов металлов [12]. Однако помимо преимуществ химические методы синтеза обладают рядом недостатков. Синтез НЧМ связан с использованием неэкологичных и токсичных реагентов, растворителей и стабилизаторов. Применение НЧМ (например, в медицине) предъявляет высокие требования к составу конечного продукта. Очистка НЧМ от нежелательных побочных продуктов, исходных реагентов и растворителей часто представляет собой трудоемкий многостадийный процесс, сложность которого, а также небольшой выход конечного продукта очистки нивелируют преимущества используемого метода получения.

Методы зеленого синтеза обладают всеми преимуществами химических методов синтеза,

но отличаются большей экологичностью. В данном случае восстановителями и стабилизаторами служат не химические реагенты, а более экологичные компоненты растительных экстрактов (табл. 1). Кроме того, методы зеленой химии базируются на использовании водных сред, а не токсичных органических растворителей, как в химических методах восстановления. Разный состав растительного сырья позволяет получать НЧМ с разным средним диаметром. Ширина распределения частиц по размерам в большинстве случаев не уступает классическим химическим методам синтеза (борогидридному, цитратному, полиольному) [13, 14], а в ряде случаев она сравнима с методами синтеза в микроэмульсиях и обратных мицеллах, позволяющих получать частицы, различающиеся по размеру не более, чем на 2–3 нм. В некоторых случаях, например в присутствии дубильных веществ, рентгенофазовый анализ образцов зеленого синтеза может быть осложнен наличием дополнительных рефлексов на рентгенограммах, относящихся к отдельным органическим компонентам экстракта. В УФ-спектрах поглощения образцов, полученных методом зеленого синтеза возможно смещение пика поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в более длинноволновую область не только за счет увеличения размера частиц, но и благодаря взаимодействию компонентов-стабилизаторов с поверхностью частицы. Если борогидридный метод синтеза AgНЧ приводит к формированию частиц со средним размером 10 нм и положением ППР при 405 нм, то зеленый синтез с использованием экстрактов цветков ромашки и календулы позволяет получать частицы со средним размером 15 и 20 нм соответственно [14]. Положение ППР в случае зеленого синтеза смещается в более длинноволновую область (450 нм), которая характерна для сферических частиц AgНЧ на 20–30 нм крупнее [15]. Взаимодействие компонентов экстракта с поверхностью НЧ также приводит к завышению гидродинамического радиуса частиц, измеряемому методом динамического светорассеяния. Микрофотографии, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), дают возможность определить как суммарный размер гибридной частицы, так и размер металлического ядра отдельно от слоя стабилизирующих агентов. В случае гибридных частиц серебра, полученных с использованием экстрактов цветков ромашки и календулы общий гидродинамический радиус частиц составляет около 30 нм, тогда как

для частиц, полученных классическим борогидридным методом синтеза, средний гидродинамический радиус получаемых частиц соответствует среднему размеру AgНЧ (10 нм) [14]. Таким образом, методы зеленого синтеза позволяют получать наноматериалы, не уступающие по характеристикам материалам, полученным классическими химическими и физическими методами. Однако при характеристике полученных частиц физико-химическими методами необходимо учитывать возможный вклад компонентов экстракта.

2.1. Методы зеленой химии: общие принципы и критерии применимости

Зеленые нанотехнологии – новая и быстро развивающаяся область научных исследований, которая фокусируется на точном контроле производства и распределения НЧ определенных размеров и форм. Развитие зеленых нанотехнологий вызывает интерес исследователей к экологически безопасному биосинтезу и минимизации использования различных химических реагентов и стабилизаторов, в том числе поверхностно-активных веществ, полимеров, дендримеров, ионных жидкостей, растворителей и других органических соединений, многие из которых в той или иной степени могут быть токсичными. Современные процессы производства НЧМ часто дороги, небезопасны и наносят вред окружающей среде. Для минимизации и устранения вредных воздействий химического синтеза ученые предлагают использовать методы зеленой химии, что подразумевает работу с экологически безопасными веществами природного происхождения [15, 16].

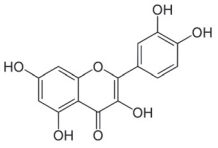
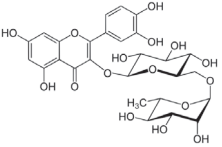
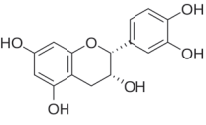
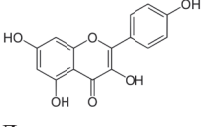
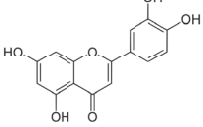
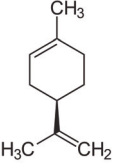
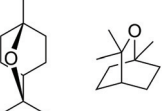
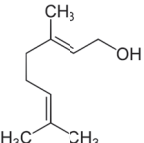
Итак, зеленая химия – это подход, направленный на минимизацию воздействия вредных химических процессов на окружающую среду и здоровье человека. В контексте получения НЧ использование принципов зеленой химии помогает разработать более устойчивые, экологически безопасные и экономически эффективные технологии. В России активное изучение и становление методов зеленой химии началось в 2005 г. при участии ученых ведущих ВУЗов страны: МГУ имени М.В. Ломоносова и РХТУ им. Д.И. Менделеева [15–17]. Основные принципы, которые используют методы зеленой химии представлены на рис. 1.

2.2. Преимущества методов зеленой химии для получения наноразмерных частиц

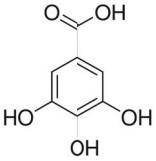
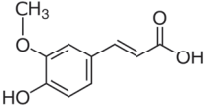
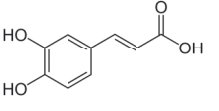
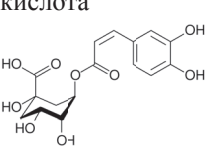
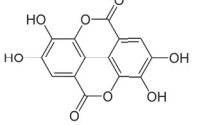
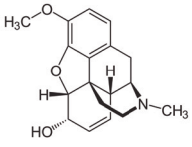
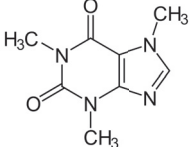
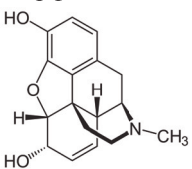
Экологическая безопасность. Снижение или полное исключение токсичных реагентов и

Т а б л и ц а 1

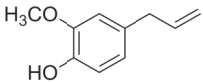
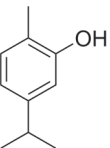
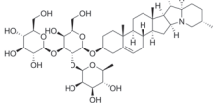
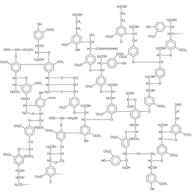
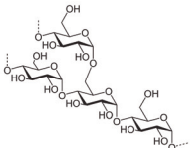
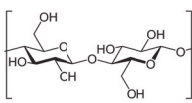
Основные классы органических веществ, входящих в состав растительных экстрактов

Основные классы химических соединений в составе растительных экстрактов	Примеры соединений	Качественная реакция на функциональные группы соединений в составе экстрактов	Примеры сырья растительного происхождения	Свойства и применение
Флавоноиды [23]	<p>Кверцетин</p>  <p>Рутин</p>  <p>Эпикатехин</p>  <p>Кемпферол</p>  <p>Лютеолин</p> 	<p>$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$ смешивают с растительными экстрактами флавоноидов (о наличии флавоноидов в экстракте свидетельствует выпадение желтого осадка)</p>	<p>Кверцетин красный лук, чеснок, клюква, черника, зеленый чай, пихта, красное вино Рутин лимонная цедра, бархатцы, черная смородина, шиповник Катехины зеленый чай, какао-бобы, черника, ежевика, малина, миндаль, фундук Кемпферол каперсы, шафран, руккола, брокколи, красный клевер, лук Лютеолин красный клевер.</p>	<p>природные антиоксиданты, предотвращают окислительные процессы (используются для очистки воды)</p>
Терпеноиды [24]	<p>Лимонен</p>  <p>Эвкалиптол (цинеол)</p>  <p>Гераниол</p> 	<p>к экстракту терпеноида последовательно добавляют CHCl_3 и конц. H_2SO_4 для образования слоя (его красно-коричневое окрашивание указывает на присутствие терпеноида в составе экстракта)</p>	<p>Лимонен цедра апельсина, лимона, грейпфрута, перечная мята, пихта Эвкалиптол листья эвкалипта, ментол, розмарин Гераниол гераниевое масло, розовое масло, цитронелловое масло, лемонграсс</p>	<p>обладают антимикробными, противогрибковыми свойствами</p>

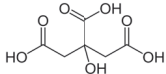

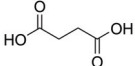
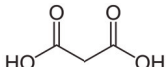
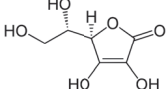
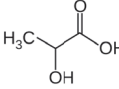
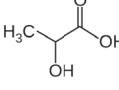
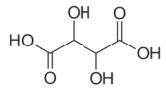
Продолжение табл. 1

Основные классы химических соединений в составе растительных экстрактов	Примеры соединений	Качественная реакция на функциональные группы соединений в составе экстрактов	Примеры сырья растительного происхождения	Свойства и применение
Фенольные соединения [25]	<p>Галловая кислота</p>  <p>Феруловая кислота</p>  <p>Кофейная кислота</p>  <p>Хлорогеновая кислота</p>  <p>Эллаговая кислота</p> 	<p>интенсивно окрашенные комплексные экстракты фенольных соединений с раствором хлорного железа (FeCl_3); кофейная кислота – зеленовато-коричневый раствор, галловая – сине-фиолетовый, феруловая – фиолетовый / сине-фиолетовый (хлорогеновую кислоту в составе экстрактов определяют по реакции с водным раствором аммиака ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), цвет раствора зелено-голубой; эллаговая кислота дает интенсивно окрашенный красно-фиолетовый раствор при реакции с NaOH</p>	<p>Галловая кислота дуб (дубильные вещества), чай (черный и зеленый), гранат. Феруловая кислота: пшеничная солома, рисовая шелуха, корица, ромашка Кофейная кислота кофейные зерна, клубника, голубика, черника, брокколи, артишок, картофель, пшеница, рожь Хлорогеновая кислота кофейные зерна, семена подсолнечника, листья черники, корни цикория, красный клевер Эллаговая кислота малина, клубника, ежевика, грецкий орех, гранат</p>	антиоксидантные свойства
Алкалоиды [26]	<p>Кодеин</p>  <p>Кофеин</p>  <p>Морфин</p> 	<p>экстракт смешивают с несколькими каплями реактива вагнера ($\text{KI} + \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O}$), выпадение красно-коричневого осадка свидетельствует о наличии алкалоидов в составе экстракта</p>	<p>Морфин опийный мак Кофеин кофейные зерна, какао-бобы, кола, чайные листья Кодеин опиумный мак</p>	выраженная биологическая активность

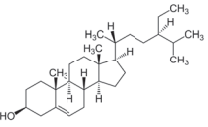
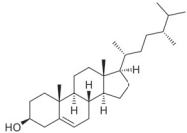
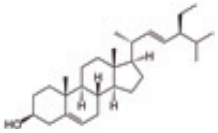
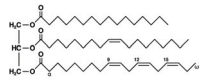
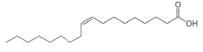
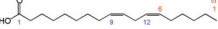
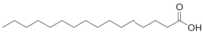
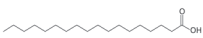
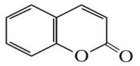
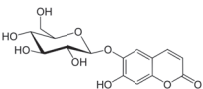
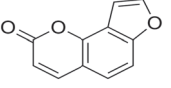
Продолжение табл. 1

Основные классы химических соединений в составе растительных экстрактов	Примеры соединений	Качественная реакция на функциональные группы соединений в составе экстрактов	Примеры сырья растительного происхождения	Свойства и применение
Эфирные масла [27]	<p>Эвгенол</p>  <p>Карвакрол</p> 	<p>экстракт растворяют в спирте (96%), затем добавляют хлорное железо (FeCl₃ 10,5%), о наличии эвгенола свидетельствует темно-зеленое окрашивание, переходящее в желтовато-зеленое</p>	<p>Эвгенол цветки гвоздики, базилик, корица Карвакрол листья орегано, тимьян, базилик</p>	<p>антисептические и противомикробные свойства (компоненты лекарственных препаратов)</p>
Сапонины [28]	<p>Соевый сапонин, аралиосапонин, соланин</p> 	<p>экстракт сапонины смешивают с бидистиллятом, затем смесь энергично встряхивают, о наличии сапонинов свидетельствует пенообразование</p>	<p>Соевый сапонин соя Аралиосапонин аралия манчжурская</p>	<p>выраженная биологическая активность (производство традиционных лекарственных препаратов)</p>
Полисахариды и лигнин [29, 30]	<p>Лигнин</p>  <p>Крахмал</p>  <p>Целлюлоза</p> 	<p>фильтрат полисахарида смешивают с несколькими каплями реактива Бенедикта (CuSO₄ + Na₂CO₃ + C₃H₄OH(COONa)₃ + H₂O), осторожно нагревают; выпадение оранжево-красного осадка свидетельствует о наличии в составе экстракта полисахаридов</p>	<p>Лигнин древесина сосны, ели, тростник, пшеничная солома Целлюлоза древесина ели, сосны, березы; хлопок, бамбук, рисовая, пшеничная, ячменная солома. Крахмал картофель, кукуруза, пшеница, рис, ячмень, топинамбур, бананы, горох, фасоль</p>	<p>биоразлагаемые материалы</p>

Продолжение табл. 1

Основные классы химических соединений в составе растительных экстрактов	Примеры соединений	Качественная реакция на функциональные группы соединений в составе экстрактов	Примеры сырья растительного происхождения	Свойства и применение
Органические кислоты [31]	<p>Лимонная кислота</p>  <p>Уксусная кислота</p>  <p>Янтарная кислота</p>  <p>Малоновая кислота</p>  <p>Аскорбиновая кислота</p>  <p>Молочная кислота</p>  <p>Яблочная кислота</p>  <p>Винная кислота</p> 	свидетельствует о присутствии CH_3COOH в составе экстракта указывает образование раствора красно-коричневого цвета с хлорным железом (FeCl_3); аскорбиновую кислоту определяют в экстракте по реакции обесцвечивания метиленовой сини; о наличии в экстракте двухосновной карбоновой кислоты свидетельствует образование ярко-синего раствора комплексного соединения с $\text{Cu}(\text{OH})_2$.	<p>Лимонная кислота лимон, лайм, черная смородина, грейпфрут</p> <p>Янтарная кислота растительные экстракты ромашки и одуванчика, продукт брожения винограда, яблоч</p> <p>Уксусная кислота винный уксус, мед, томат, яблоки, груши</p> <p>Малоновая кислота спаржа, крапива, чистотел, рябина, черника</p> <p>Яблочная кислота яблоки, барбарис, малина, рябина, ремень</p> <p>Винная кислота виноград, яблоки, груши</p> <p>Аскорбиновая кислота лимон, лайм, яблоки, грейпфрут, апельсин</p>	консерванты, регуляторы pH (компоненты лекарственных препаратов)

Окончание табл. 1

Основные классы химических соединений в составе растительных экстрактов	Примеры соединений	Качественная реакция на функциональные группы соединений в составе экстрактов	Примеры сырья растительного происхождения	Свойства и применение
<p>Фитостерины, триглицериды, жирные кислоты [32, 33]</p>	<p>β-Ситостерин</p>  <p>Кампестерол</p>  <p>Стигмастерол</p>  <p>Триглицериды</p>  <p>Олеиновая кислота</p>  <p>Линолевая кислота</p>  <p>Пальмитиновая кислота</p>  <p>Стеариновая кислота</p> 	<p>реакция с азокрасителем (судан III), образование раствора красного цвета свидетельствует о наличии триглицерида в составе экстракта; реакция с бромной водой используется для обнаружения в составе экстрактов непредельных жирных кислот</p>	<p>β-Ситостерин соя, подсолнечник, овес, авокадо Кампестерол красный клевер, соевое и рапсовые масла Триглицериды пальмовое масло, какао-масло, свиное сало Жирные кислоты льняное масло, масло подсолнечника, грецкий орех, красный клевер, оливковое масло</p>	<p>компоненты лекарственных препаратов, косметических средств</p>
<p>Кумарины [34]</p>	<p>Кумарин</p>  <p>Эскулин</p>  <p>Ангелицин</p> 	<p>экстракт смешивают с NaOH (о наличии кумаринов свидетельствует появление желтой окраски)</p>	<p>Кумарин бобы тонка, зубровка, клевер, абрикосы, вишня Эскулин кора и листья конского каштана, французский орех, бобы тонка Ангелицин сельдерей и растения из семейства зонтичных</p>	<p>имеют выраженные антимикробные, противогрибковые свойства, применяются в качестве противоопухолевых и противовирусных препаратов</p>

растворителей, а также минимизация отходов, уменьшающих загрязнение окружающей среды.

Биосовместимость. Получение НЧМ, пригодных для медицинского применения.

Низкая энергозатратность. Использование энергии из возобновляемых источников и разработка процессов при низких температурах и давлении, что снижает энергозатраты.

Экспрессность и простота синтеза. Исключение сложных стадий и сокращение общего времени синтеза.

Экономическая выгода. Использование возобновляемого сырья, такого как растительные экстракты, а также сокращение затрат на утилизацию токсичных отходов [15–18].

Среди основных методов зеленой химии для получения различных НЧМ выделяют биологический синтез с использованием микроорганизмов или водных экстрактов растительного происхождения, синтез с использованием ферментов, а также механохимический, сонохимический (ультразвуковой), микроволновый и гидротермальный методы [19].

2.3. Основные методы зеленой химии

Биологический синтез основан на использовании микроорганизмов и растительных экстрактов. В качестве микроорганизмов используют бактерии, грибы и водоросли, которые способны синтезировать НЧ благодаря протекающим в них метаболическим процессам. Например,

AgНЧ могут быть получены с использованием бактерий *Pseudomonas aeruginosa*. В качестве растительных экстрактов используют, как правило, биологически активные вещества растительных культур. Эти вещества могут выступать как в роли восстановителей, так и в роли стабилизаторов НЧ. Например, экстракт листьев *Azadirachta indica* применяется для синтеза AuНЧ и AgНЧ.

Механохимический метод. Физико-химический способ синтеза НЧ с помощью механического воздействия, например, в шаровых мельницах. Метод исключает использование токсичных реагентов.

Сонохимический метод. Предполагает использование ультразвукового воздействия для инициирования химических реакций в жидкостях. Этот метод позволяет снизить потребление энергии и растворителей.

Гидротермальный метод основан на проведении реакции получения НЧ из прекурсоров в водных средах при повышенных температуре и давлении. Вода выступает в качестве растворителя, что делает процесс экологически безопасным.

Микроволновый синтез. Использование микроволнового излучения для быстрого нагрева реагентов, что позволяет за короткое время получать НЧ с высокой степенью однородности.

Использование ферментов. Ферменты (лактазы, редуктазы) выступают в роли восстановителей ионов металлов из их прекурсоров-солей. Процесс экологически безопасен и



Рис. 1. Принципы «зеленой химии»

характеризуется высокой эффективностью. На рис. 2 представлена общая схема биологических методов зеленой химии для получения НЧМ. Получение НЧ методами зеленой химии предполагает проведение дополнительных исследований, которые должны быть направлены, в первую очередь, на изучение химического состава растительного сырья и экстрактов. В большинстве случаев растительные экстракты имеют крайне сложный состав и содержат спектр соединений, принадлежащих к разным классам органических веществ. Тем не менее, использование растительных экстрактов для получения НЧМ и их оксидов является популярным и экологически безопасным подходом. Вещества, входящие в состав натуральных экстрактов, как правило, выполняют две важнейшие функции, выступая в роли восстановителей и стабилизаторов НЧ (зачастую при получении НЧМ восстановитель и стабилизатор – одно и то же вещество). Примеры основных классов органических веществ, входящих в состав растительных экстрактов [20–22], рассмотрены ниже.

2.4. Основные классы органических веществ, входящих в состав растительных экстрактов

Фенольные кислоты (галловая, хлорогеновая, феруловая) могут выполнять роль как восстановителей, так и стабилизаторов при зеленом синтезе получения AgНЧ и AuНЧ. Фенольные кислоты обладают сильными восстановительными свойствами за счет гидроксильных (ОН–)

и кислотных (COOH–) групп. Они способны восстанавливать ионы металлов и выступать в качестве стабилизаторов НЧ. COOH-группы являются носителями отрицательного заряда и способны эффективно связываться с частично положительно заряженными поверхностными атомами металлов, тем самым предотвращая их агрегацию.

Флавоноиды (кверцетин, рутин, апигенин). Благодаря большому числу ОН-групп флавоноиды эффективно восстанавливают ионы металлов до атомов, которые быстро агрегируют с образованием НЧМ. Кроме того, гидроксильные группы образуют водородные связи с поверхностью НЧМ, предотвращая их дальнейшую агрегацию. Таким образом, подобно фенольным кислотам они выполняют функцию как восстановителей, так и стабилизаторов. Кроме того, флавоноиды позволяют получать биоактивные и биосовместимые наночастицы. Например, кверцетин используется для синтеза AgНЧ и AuНЧ, которые проявляют антибактериальные свойства.

Органические кислоты (аскорбиновая, лимонная, яблочная, щавелевая и др.). Органические кислоты, такие как фенольные кислоты и флавоноиды, могут выполнять роль и восстановителей, и стабилизаторов. Кислотные COOH-группы при ионизации являются носителями отрицательного заряда и способны эффективно связываться с частично положительно заряженными поверхностными атомами металлов, тем самым предотвращая их агрегацию. Например, аскорбиновая кислота активно используется в зеленом

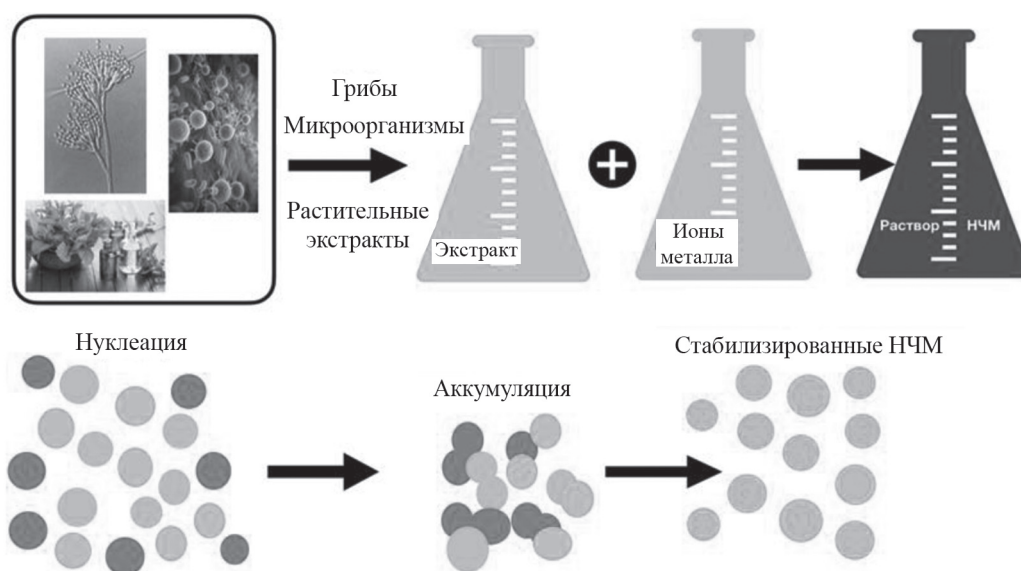


Рис. 2. Схема биологического метода зеленой химии для получения НЧМ

синтезе НЧМ и восстанавливает ионы Ag^+ , Au^{3+} , Cu^{2+} до атомов металлов. Лимонная кислота применяется в синтезе AuНЧ , обеспечивая образование стабильной коллоидной суспензии НЧ.

Эфирные масла (эвгенол, карвакрол) имеют в своих структурах фенольные фрагменты и свободные ОН-группы, которые могут восстанавливать ионы металлов. Доказанные антибактериальные и противогрибковые свойства эфирных масел делают получаемые НЧ биологически активными. Например, содержащие эвгенол экстракты используют для синтеза AgНЧ с антимикробным действием.

Терпеноиды (гераниол, лимонен, каротиноиды) имеют в своих структурах многочисленные функциональные группы: гидроксильные, альдегидные, кето ($-\text{C}(\text{O})\text{H}$, $-\text{OH}$, $-\text{C}(\text{O})$), участвующие в восстановлении ионов металлов из их прекурсоров-солей. Некоторые терпеноиды могут служить стабилизаторами, образуя на поверхности НЧ защитную гидрофобную органическую оболочку. Например, лимонен используется в синтезе AuНЧ , значительно снижая их агрегацию.

Алкалоиды. Эффективные стабилизаторы наночастиц, придающие им новые функциональные свойства. Благодаря своим N-содержащим гетероциклам алкалоиды могут образовывать прочные комплексы с НЧ. Кроме того, они улучшают взаимодействие НЧ с биологическими структурами, повышая селективность их биомедицинского действия.

Сапонины чаще всего выполняют функции стабилизаторов и эмульгаторов НЧ. Они могут стабилизировать НЧ за счет взаимодействия своих гидрофобных и гидрофильных фрагментов. Кроме того, под их воздействием может происходить самосборка наноструктур. Сапонины образуют мицеллы вокруг наночастиц, улучшая их растворимость.

Полисахариды (крахмал, хитозан, альгинат, целлюлоза) являются экологически чистыми стабилизаторами, предотвращающими агрегацию НЧ, что обеспечивает их длительную стабильность. Крахмал и хитозан могут также проявлять себя в роли восстановителей ионов металлов. Более подробная информация по основным классам органических веществ, входящих в состав растительных экстрактов, представлена в табл. 1.

Методы зеленой химии для синтеза НЧМ открывают новые возможности для развития нанотехнологий. Они не только снижают вредное воздействие химических реагентов на окружающую

среду и организм человека, но также делают процесс их получения более доступным и экономически выгодным. НЧМ обладают уникальными физическими, химическими и каталитическими свойствами, что делает их востребованными в различных областях. Рассмотрим некоторые направления их практического применения [35].

2.5. Области практического применения НЧМ

Биомедицина. НЧМ используют в методах биомедицинской диагностики и визуализации, таких как магнитно-резонансная и компьютерная томография. AuНЧ и AgНЧ применяют в оптических биосенсорах для детектирования патогенов. Важным и востребованным биомедицинским приложением является направленная доставка лекарств к пораженным органам и тканям, включая раковые опухоли. Все чаще AuНЧ и AgНЧ , стабилизированные биосовместимым полимером или органическим лигандом, используют для фототермической и фотоокислительной терапии опухолевых образований. Кроме того, AgНЧ и НЧ меди (CuНЧ) используют как материалы с выраженным антимикробным действием для уничтожения бактерий, грибов и вирусов. Они могут применяться в медицине и в качестве компонентов перевязочных материалов и покрытий. НЧМ могут также служить векторами для доставки генетического материала в клетки.

Электроника и сенсоры. НЧМ используют при изготовлении сенсоров и датчиков для определения/улавливания токсичных и ядовитых газов. Например, НЧ платины (PtНЧ) помогают в определении низких концентраций водорода, AgНЧ применяют для создания проводящих чернил в гибкой электронике и печатных платах, AuНЧ и AgНЧ – для улучшения свойств светодиодов, лазеров и фотодетекторов.

Оптика и фотоника. Плазмонные НЧМ (Ag и Au) применяют для усиления сигналов в Рамановской спектроскопии. Используют в камерах, микроскопах и оптических системах.

Катализ. НЧМ активно используют в гетерогенном катализе. Золотые НЧ применяют, например, в процессах окисления монооксида углерода. PtНЧ активно используют в топливных элементах и реакциях гидрирования. НЧ металлов применяют также для фотохимического разложения воды и очистки сточных вод

Энергетика. AgНЧ , AuНЧ увеличивают эффективность солнечных панелей, улучшая

их светопоглощение. Кроме того, НЧМ применяют для увеличения емкости и долговечности аккумуляторов.

Экология. AgНЧ используют для обеззараживания воды, наночастицы железа применяют для очистки воды от тяжелых металлов. Наносенсоры на основе НЧМ используют для детекции загрязнений воздуха и воды.

Косметика. AgНЧ являются активными компонентами в составе кремов, дезодорантов и зубных паст.

Промышленность. AgНЧ используют в производстве текстиля при создании тканей с антибактериальным действием. Кроме того, НЧМ часто улучшают адгезию, износостойкость и антикоррозийные свойства покрытий. Металлические нанопорошки применяют для создания деталей сложной формы в аддитивных технологиях (3D-печать).

Пищевая промышленность. AgНЧ используют в качестве компонентов в составе упаковочных материалов. Добавление их в упаковку продлевает срок хранения продуктов за счет доказанных антибактериальных свойств. Наносенсоры на основе AgНЧ помогают контролировать качество продуктов.

На рис. 3 приведена схема, где представлены основные направления практического использования НЧМ, открывающие новые возможности для технологического и научного прогресса [15–19]. Их уникальные свойства позволяют создавать инновационные решения в медицине,

энергетике, экологии и других областях. Однако важно учитывать экологические и биологические риски, связанные с их использованием, и разрабатывать безопасные методы применения [35].

3. Свойства и применение НЧМ

3.1. Наночастицы золота (AuНЧ)

AuНЧ обладают уникальными физико-химическими, оптическими и каталитическими свойствами, которые делают их широко востребованными в различных областях. AuНЧ проявляют поверхностный плазмонный резонанс, который определяет их яркий цвет и высокую чувствительность к изменениям диэлектрических свойств окружающей среды. Эти свойства позволяют использовать материалы на их основе в биосенсорах и методах оптической визуализации биологических молекул. AuНЧ считаются инертными и безопасными для биологических систем, что делает их подходящими для применения в медицине, включая доставку лекарств и диагностику. Они устойчивы к окислению и сохраняют свои свойства в широком диапазоне температур и pH. Благодаря современным методам синтеза можно получать НЧ разной формы (сферы, стержни, звезды), а также функционализировать их поверхность, что позволяет адаптировать AuНЧ под конкретные практические приложения. Кроме того, AuНЧ обладают высокой каталитической активностью [36–44].

При проведении биологического синтеза AuНЧ используют разные источники природных



Рис. 3. Основные направления практических приложений НЧМ

восстановителей и стабилизаторов: микроорганизмы, растения, цветы, а также экстракты фруктов и овощей. Многочисленные исследования показывают, что вторичные метаболиты, входящие в состав таких природных экстрактов, выступают в качестве как восстановителей Au^{3+} из $HAuCl_4$ (прекурсор для получения НЧ), так и стабилизирующих лигандов [36, 37]. В табл. 2 представлены результаты исследований, связанных с использованием различных растительных экстрактов для синтеза AuНЧ, их основные характеристики и актуальные направления применения [41–53].

Представленные в табл. 2 результаты исследований подтверждают актуальность использования методов зеленой химии для получения AuНЧ. Однако проведение зеленого синтеза требует учитывать сложный состав используемых природных экстрактов и их ограниченную доступность в некоторых регионах.

3.2. Наночастицы серебра (AgНЧ)

AgНЧ относятся к наиболее изученным на сегодняшний день наноматериалам. Они обладают уникальными физико-химическими и биологическими свойствами [53–55]. Во-первых, AgНЧ имеют высокую химическую стабильность и устойчивы к изменениям температуры. Во-вторых, существующие методы синтеза AgНЧ отличаются экспрессностью и простотой, а также позволяют контролировать их форму и размер, в том числе благодаря многообразию существующих лигандов-стабилизаторов. AgНЧ обладают высокой чувствительностью к изменению диэлектрических свойств окружающей среды, что делает их применимыми для создания сенсорных материалов при использовании такого явления, как поверхностный плазмонный резонанс. Доказано, что AgНЧ проявляют антимикробные свойства: они эффективно уничтожают бактерии, вирусы и грибы, включая устойчивые к антибиотикам микроорганизмы. Их антибактериальная активность связана с выделением ионов Ag^+ , взаимодействующих с клеточными мембранами различных микроорганизмов. AgНЧ активны по отношению к большому числу патогенов, что делает их универсальными в медицинских и промышленных приложениях. Считается, что при правильной дозировке AgНЧ безопасны для человека и могут быть использованы как компоненты систем доставки лекарств [55].

Для получения AgНЧ методами зеленой химии используют различные природные источники: микроорганизмы, растительные, цветочные

и фруктовые экстракты, коровье молоко. Экстракты, полученные из различных видов и частей растений, наиболее изучены для зеленого синтеза AgНЧ. Многочисленные исследования показывают, что вторичные метаболиты, обнаруженные в составе растительных экстрактов, выступают в качестве основных агентов, ответственных и за восстановление ионов Ag^+ из $AgNO_3$ (основной прекурсор), и за стабилизацию AgНЧ [56, 57]. В последнее время многие природные полимеры, такие как хитозан, гепарин, гиалуроновая кислота, крахмал, активно используют в зеленом синтезе металлических НЧ в качестве восстанавливающих и стабилизирующих агентов. Среди природных полимеров крахмал является одним из наиболее перспективных, биосовместимых и биоразлагаемых материалов, а также отличается высокой доступностью и низкой стоимостью. Эффективность крахмала как субстрата для получения НЧ была продемонстрирована в многочисленных экспериментах. В табл. 3 представлены примеры работ, связанных с использованием различных природных экстрактов для синтеза AgНЧ, их основные характеристики и актуальные направления их применения [58–73].

Таким образом, AgНЧ сочетают в себе антибактериальную активность, уникальные оптические свойства, высокую химическую стабильность и находят применение в различных областях от оптоэлектроники и нано- и микросенсорики до медицины и биологии.

3.3. Наночастицы меди (CuНЧ)

CuНЧ являются еще одним примером перспективных НЧМ, они находят применение в различных отраслях благодаря своей высокой электронной проводимости, а также антимикробной и каталитической активности [76]. Медные НЧ являются более доступными и дешевыми, чем AgНЧ и AuНЧ, что снижает затраты на создание материалов на их основе. При этом, как и AgНЧ, они обладают выраженной антибактериальной активностью: ингибируют рост бактерий *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Propionibacterium acnes* и *Salmonella typhimurium*. Однако CuНЧ менее инертны, поэтому на этапе проведения синтеза необходима их стабилизация для предотвращения возможных окислительных процессов. Биосинтезированные CuНЧ проявляют также антиоксидантные, противовоспалительные, противогрибковые, противоопухолевые свойства, улучшают функцию печени и гематологические

Т а б л и ц а 2

Растительные экстракты и их состав для синтеза AuНЧ, характеристики частиц

Растительный экстракт для получения AuНЧ	Основные компоненты в составе экстракта	Характеристики AuНЧ	Свойства и применение
Экстракт листьев <i>Coleus scutellarioides</i> (L.) (пятицветная мята)	кверцетин, карвакрол, розмариновая, кофеиновая кислоты	AuНЧ имеют сферическую форму, средний размер составил 40 нм (ППР регистрировали при 532 нм, кристаллическая структура AuНЧ подтверждена РСА)	противораковая активность и антиоксидантные свойства [41]
Экстракт <i>Descurainia sophia</i> (дескурения Софии)	кверцетин, рутин, кемпферол, феруловая, кофеиновая кислоты, олеиновая, линолевая, пальмитиновая кислоты, сапонины	AuНЧ полиморфны и агрегированы, диапазон размеров 10–38 нм	лечение астмы [42]
Водный экстракт сои	карвакрол, лимонен, глицитеин, генистеин, линолевая, линоленовая кислоты	AuНЧ агрегированы, имеют сферическую форму, диапазон размеров 22–69 нм (ППР регистрировали при 570 нм)	антиоксидантные свойства [43]
Травяной экстракт <i>Heracleum persicum</i> (персидский борщевик)	кверцетин, рутин, кемпферол, лимонен, терпены, феруловая, кофеиновая, ванилиновая кислоты	кристаллическая структура AuНЧ соответствует ГЦК золота	цитотоксическая активность в лечении рака желудка [44]
Экстракт цветов <i>Calendula officinalis</i> (календула лекарственная)	кверцетин, рутин, алигенин, β-каротин, гераниол, линалол, феруловая, галловая, кофеиновая кислоты	AuНЧ имеют форму полусферы, размер лежит в диапазоне 20–25 нм	терапевтический эффект на вызванную диабетом сердечную дисфункцию [45]
Водный экстракт <i>Andrographis paniculata</i> A. (андрографис метельчатый)	кверцетин, кемпферол, лактоны, лимонен, феруловая, кофеиновая кислоты	AuНЧ имеют сферическую форму, размер частиц лежит в диапазоне 10–15 нм	колориметрическое обнаружение тяжелых металлов, каталитическое удаление органических красителей [46]
Водный экстракт <i>Passiflora ligularis</i> Juss (гранадилла сладкая – маракуйя)	кверцетин, рутин, кемпферол, лимонен, линалоол, β-каротин, галловая, кофеиновые кислоты, триптофан	AuНЧ имеют сферическую форму, размер частиц лежит в диапазоне 8,4–13,0 нм	нейропротекторный эффект в терапии аутизма [47]
Экстракт цветков <i>Azadirachta indica</i> (индийская сирень)	кверцетин, рутин, кемпферол, катехины, таннин, лимонен, азадирон, галловая, феруловая кислоты, жирные кислоты	ППР регистрировали при 530 нм (методом РСА подтверждена кристаллическая природа и соответствие ГЦК золота)	антиоксидантные и антимикробные свойства AuНЧ в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий [48]

Окончание табл. 2

Растительный экстракт для получения AuНЧ	Основные компоненты в составе экстракта	Характеристики AuНЧ	Свойства и применение
Водный экстракт листьев <i>Ziziphus spina-christi</i> (христова колочка)	кверцетин, рутин, мирицетин, сапонины, галловая, феруловая, кумариновая кислоты, жирные кислоты	форма AuНЧ сферическая, диапазон размеров 56–89 нм (методом РСА подтверждена кристаллическая природа и соответствие ГЦК золота)	лечение рака молочной железы [49]
Экстракт грибов	тритерпены, белки и аминокислоты (лизин, аргинин, лейцин), полисахариды, галловая, феруловая, кумаровая кислоты	AuНЧ имеют сферическую форму, размер 13 нм (ППР регистрировали при 530 нм)	AuНЧ обладают противораковой эффективностью против клеток рака молочной железы [50]
Экстракт листьев <i>Nothapodytes foetida</i>	кверцетин, камптотетин, кемпферол, сквален, лимонен, галловая и феруловая кислоты	AuНЧ имеют сферическую форму, размер в диапазоне 5–30 нм (ППР регистрировали при 524 нм, подтверждены кристаллическая природа и ее соответствие ГЦК золота)	AuНЧ снижают жизнеспособность клеток MG63 и A549, проявляя противораковую активность, а также ранозаживляющие свойства [51]
Водный экстракт <i>Sarcophyton crassocaule</i> (морской коралл)	холестановые производные, флавоноиды, дитерпены, фенольные кислоты	AuНЧ имеют овальную форму, размер в диапазоне 5–50 нм (ППР регистрировали при 540 нм)	бактерицидная эффективность в отношении бактериальных патогенов, антиоксидантная активность [52]

функции. В некоторых работах [77, 78] отмечается, что использование CuНЧ приводит к уничтожению раковых клеток за счет повышения уровня активного кислорода в клетках: CuНЧ, а также выделяемые ими ионы меди проникают через клеточные мембраны раковых клеток и вызывают их разрушение. Как и другие НЧМ, CuНЧ являются эффективными катализаторами для различных химических реакций, включая восстановление, окисление и фотокатализ. В табл. 4 представлены работы, связанные с использованием различных природных экстрактов для синтеза CuНЧ, их основные характеристики и актуальные направления их применения [78–82]. Показано, что CuНЧ обладают такими характеристиками, как высокая электропроводность, антимикробные свойства и каталитическая активность (табл. 4). Доступность и низкая

стоимость меди и соединений меди делают их особенно привлекательными для широкого использования в различных отраслях [81–82].

3.4. Наночастицы платины (PtНЧ)

PtНЧ – уникальные наноматериалы, известные своими исключительными каталитическими и электрохимическими свойствами. Они играют важную роль в медицине, энергетике, электронике и других областях благодаря своей высокой стабильности и биосовместимости [83]. Основные преимущества платиновых НЧ перечислены ниже.

Высокая каталитическая активность. PtНЧ являются одними из наиболее эффективных катализаторов, чаще всего используемых в реакциях окисления, восстановления и гидрирования/дегидрирования.

Химическая стабильность. Платина является инертным металлом, что обеспечивает химическую стабильность наноматериалов на ее основе.

Электрохимическая активность. PtНЧ обладают высокой электронной проводимостью, что делает их идеальными для топливных элементов, аккумуляторов и сенсоров.

Регулируемые размер и форма. Возможность контролировать размер и морфологию PtНЧ в ходе синтеза позволяет оптимизировать их свойства для конкретных целей.

Биосовместимость. PtНЧ считаются безопасными для биологических систем, что делает их подходящими для медицинских приложений.

В табл. 5 представлены примеры работ, связанных с использованием различных природных экстрактов для синтеза PtНЧ, их основные характеристики и актуальные направления их применения. В качестве основного прекурсора платины используют гексагидрат гексахлороплатината водорода [84–86]. Несмотря на высокую стоимость платины, развитие технологий позволяет минимизировать расход материала, что делает использование PtНЧ экономически обоснованным и экологически целесообразным [83–86].

3.5. Наночастицы палладия (PdНЧ)

PdНЧ обладают выраженными каталитическими и антибактериальными свойствами. Универсальность делает их востребованными в химической промышленности, медицине, энергетике и других областях [87].

К основным преимуществам наночастиц палладия следует отнести их высокую каталитическую активность с выраженной селективностью в органическом синтезе (реакции гидрирования/дегидрирования, реакция Сузуки, реакция Хека), механическую и термическую устойчивость, а также инертность. Как и другие НЧМ, палладиевые НЧ обладают выраженными антимикробными свойствами в отношении широкого спектра патогенных микроорганизмов, что делает возможным их практическое применение в медицине. PdНЧ являются плазмонными частицами, что позволяет использовать их в спектроскопии и для создания сенсорных систем [88].

В литературе представлены различные методы синтеза PdНЧ, в том числе методами «зеленой химии» (табл. 6) [87–91]. На этапе проведения

синтеза, оптимизируя условия его протекания, можно получать PdНЧ с разными размерами и формами (сферы, наностержни, нанопластины). PdНЧ обладают меньшей способностью к агрегации по сравнению с другими НЧМ, поэтому зачастую их используют в чистом виде (например, в гетерогенном катализе).

PdНЧ благодаря своим уникальным каталитическим, антимикробным и электрохимическим свойствам находят применения в различных областях (табл. 6). Они играют ключевую роль и в решении ряда вопросов биомедицины благодаря биосовместимости. Несмотря на высокую стоимость палладия, его использование в наноформе позволяет сократить расход материала, делая применяемые нанотехнологии более экономичными [87–92].

4. Заключение

НЧМ обладают уникальными оптическими, каталитическими и биологическими свойствами. Эти свойства делают их ключевыми наноматериалами для применения в медицине, косметологии, наносенсорике, электронике, промышленном катализе, энергетике, экологии и других областях.

Обзор рассматривает перспективные методы зеленой химии в синтезе НЧМ и основные направления их использования, являющиеся востребованными в последние годы в науке и прикладных направлениях. Методы зеленой химии – это достаточно новое и перспективное направление, ориентированное на создание надежных и экологически безопасных технологий получения НЧМ. Использование природных растительных и биологических систем и минимизация применения в синтезе НЧМ токсичных химических реагентов делают эти методы привлекательными как с научной, так и с технологической точек зрения.

Методы зеленого синтеза позволяют получать новые наноматериалы на основе НЧМ с регулируемым размером, формой и важными для применения физико-химическими свойствами, что позволяет адаптировать их под конкретные практические задачи. Более того, такой подход соответствует принципам устойчивого развития общества, снижая риски воздействия на окружающую среду и уменьшая производственные затраты.

Перспективы развития зеленого синтеза НЧМ связаны с эффективным масштабированием

Растительные экстракты для синтеза AgНЧ серебра, их состав, характеристики частиц

Растительный экстракт для получения AgНЧ	Основные компоненты в составе экстракта	Характеристики AgНЧ	Свойства и применение
<i>Shikakai, Reetha</i> (мыльные орехи)	кверцетин, катехин, эпикатехин, кемпферол, галловая кислота, β -ситостерол	средний размер AgНЧ 30 нм, форма частиц сферическая (ППР регистрировали при 401 нм)	AgНЧ использовали в качестве эффективного SERS-активного субстрата [56]
<i>Parthenium hysterophorus</i> (парфениновый гистерофорус)	Кверцетин, Кемпферол, Амброзин, Лимонен, Кофеиновая, хлорогеновые кислоты	средний размер AgНЧ 19 нм, форма частиц сферическая (ППР регистрировали при 415 нм)	AgНЧ были использованы в качестве антибактериального средства в отношении бактерий <i>E. coli</i> и <i>Pseudomonas</i> [59].
<i>Nelumbo Nucifera</i> (священный лотос)	нуклеферин, кверцетин, кемпферол, галловая, хлорогеновая, эллаговая кислоты	средний размер AgНЧ 90 нм (ППР регистрировали при 450 нм)	область применения не определена [60]
<i>Astragalus</i> (копеечник, листья альпийского серпа)	кемпферол, кверцетин, астрагалозид, галловая, эллаговая, хлорогеновая кислоты, аспарагиновая и глутаминовая кислоты	форма AgНЧ сферическая, средний размер 35 нм	область применения не определена [61]
<i>Gmelina arborea</i> (гмелина древесная)	кверцетин, кемпферол, рутин, галловая, хлорогеновая, эллаговая кислоты, кумарины гмелинол и лулеол, β -ситостерин	форма AgНЧ сферическая, средний размер 17 нм	высокая каталитическая активность [62]
Экстракт кожуры граната	лютеолин, кемпферол, кверцетин, цианидин, β -ситостерол, лимонная, малоновая кислоты, эллаговая, галловая, хлорогеновые кислоты	бимодальное распределение AgНЧ по размерам: 17–30 и 3–7 нм (ППР регистрировали при 403 нм)	антимикробные свойства [63]
<i>Hibiscus sabdariffa</i> (суданская роза)	кверцетин, лютеолин, полисахариды, лимонная, малоновая, аскорбиновая кислоты, галловая, эллаговая, хлорогеновая кислоты	средний размер AgНЧ 15 нм	антимикробная активность AgНЧ в отношении грамположительных и грамотрицательных бактерий [64]
<i>Eucalyptus macrocarpa</i> (эвкалипт)	цинеол, лимонен, мирцен, рутин, кемпферол, кверцетин, эскулин, катехин, лимонная, аскорбиновая кислоты, галловая, хлорогеновая, эллаговая кислоты	AgНЧ имеют сферическую форму, размер в диапазоне 10-100 нм; имеется фракция с кубическими AgНЧ от 10 до 50 нм	Область применения не определена [65].
Листья кустарника <i>Salvadora persica</i> (зубное дерево)	сольвадорин, кверцетин, кемпферол, рутин, галловая кислота, катехин	форма AgНЧ сферическая, средний размер 3 нм	антибактериальная активность AgНЧ в отношении бактерий <i>Klebsiella</i> sp. и <i>Staphylococcus</i> sp. [66]

Окончание табл. 3

Растительный экстракт для получения AgНЧ	Основные компоненты в составе экстракта	Характеристики AgНЧ	Свойства и применение
Экстракт овощных отходов из листьев, стеблей и корней	кверцетин, кемпферол, рутин, галловая, хлорогеновая, эллаговая кислоты, β-каротин, лютеин, лимонная, молочная, яблочная кислоты, пектин, целлюлоза	форма AgНЧ сферическая, размер от 10 до 90 нм	Антибактериальная активность в отношении бактерий <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Acinetobacter baumannii</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i> и <i>Pseudomonas aeruginosa</i> [67]
<i>Myrtaceae</i> (мирт)	цинеол, лимонен, β-пипен, α-пипен, мирицетин, кверцетин, эвгенол, галловая, хлорогеновая кислоты, пектин, масляная, лимонная кислоты	ППР в диапазоне длин волн от 417 до 462 нм, диапазон AgНЧ 5–55 нм, форма AgНЧ сферическая	область применения не определена [68]
Экстракт виноградной кожуры	ресвератрол, катехин, кверцетин, цианидин, эллаговая кислота, лютеолин, жирные кислоты, винная, яблочная, лимонная кислоты	форма AgНЧ сферическая	область применения не определена [69]
<i>Acalypha hispida</i> (вечнозеленый кустарник Лисий хвост)	кверцетин, кемпферол, лютеолин, галловая, хлорогеновая, эллаговая кислоты, бетаин, катехин, лимонная, яблочная кислоты	форма AgНЧ сферическая, средний размер 50 нм	наносенсор на основе AgНЧ для обнаружения загрязняющих веществ в промышленных стоках [70]
Луковица <i>Urginea indica</i>	сцилларен, сциллитозид, кверцетин, кемпферол, галловая, эллаговая кислоты, индицин, яблочная, лимонная кислота	форма AgНЧ сферическая, размер 9–30 нм (ППР при 420 нм, РФА подтвердил кристаллическую природу и ГЦК серебра)	антимикробная активность. AgНЧ в отношении бактерий <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (22,66±3,05 мм), <i>S. Aureus</i> (15,33±0,57 мм), <i>E. coli</i> (14±1 мм), и грибов, таких как <i>Candida albicans</i> (35,6 мм), с заметной зоной ингибирования [71]
Листья <i>Acacia nilotica</i> - (акация нильская)	танины, галловая, эллаговая, хлорогеновая кислоты, лютеолин, кверцетин, кемпферол, акациевая камедь, сапонины акации, яблочная, лимонная кислоты	форма AgНЧ сферическая, средний размер 23,65 нм (ППР при 428 нм, кристаллическая природа подтверждена данными РСА, ГЦК серебра)	антибактериальная активность AgНЧ в отношении различных штаммов бактерий [72]
Листья <i>Verbascum insulare Boiss</i> (вербасум островной)	кверцетин, лютеолин, алигенин, галловая, хлорогеновая, эллаговая кислоты	форма AgНЧ сферическая, средний размер 25 нм (ППР регистрировали при 422 нм, по данным РФА кристаллическая природа и ГЦК серебра)	область применения не определена [73]

Т а б л и ц а 4

Растительные экстракты и их состав для синтеза CuНЧ, характеристики частиц

Растительный экстракт для получения CuНЧ	Основные компоненты в составе экстракта	Прекурсор Cu	Характеристики CuНЧ	Свойства и применение
Экстракт из корневища куркумы	куркумин, турмерон, атлантон, кверцетин, кемпферол, феруловая, галловая кислоты	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	CuНЧ имеют сферическую форму, размеры 10–60 нм (РСА подтверждает образование кристаллической меди)	эффективны в восстановлении суставного хряща при остеоартрите [78]
Листья <i>C. Asiatica</i> (готукола)	тинозид, азиатигиновая кислота, кверцетин, рутин, кемпферол, рутин, галловая, хлорогеновая, кофеиновая кислоты, аспарагиновая, глутаминовая кислоты	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	ППР лежит в диапазоне 550–600 нм (CuНЧ имеют преимущественно сферическую форму с отдельными включениями частиц кубической формы, кристаллическая структура меди подтверждена РСА)	CuНЧ используют для обнаружения сахаров – глюкозы и фруктозы [79].
Листья <i>Tinospora cordifolia</i> (тиноспоры сердцелистной) и <i>Andrographis paniculata</i> (андрографиса метельчатого)	палматин, берберин, кверцетин, рутин, кемпферол, тиноспорадиол, галловая, хлорогеновая кислоты	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	средний размер CuНЧ в диапазоне 1–4 нм, структура CuНЧ соответствует ГЦК меди	каталитическая активность CuНЧ на поверхности цеолитов [80]
Экстракт из порошка <i>Curcuma longa</i>	куркумин, турмерон, зингиберен, кверцетин, кемпферол, феруловая, кофеиновая кислоты	$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	средний размер CuНЧ в диапазоне 5–20 нм, кристаллическая природа меди подтверждена РСА	антибактериальная активность CuНЧ в отношении грамположительных и грамотрицательных микроорганизмов (<i>B. subtilis</i> и <i>E. coli</i>) [81]
Хлопковое волокно	карбоксиметил – целлюлоза	CuCl_2	CuНЧ имеют сферическую форму, средний размер $(5,5 \pm 0,5)$ нм, ППП при 420 нм	наноматериал для электрохимического зондирования [82]

Т а б л и ц а 5

Растительные экстракты для синтеза PtНЧ, их состав и характеристика частиц

Растительный экстракт для получения PtНЧ	Основные компоненты в составе экстракта	Прекурсор Pt	Характеристики PtНЧ	Свойства и применение
Экстракт красных водорослей	желатин	$H_2PtCl_6 \cdot 6 (H_2O)$	PtНЧ имеют сферическую форму, средний размер $(29,5 \pm 5,4)$ нм (кристаллическая природа ГЦК платины подтверждена PCA)	радиосенсибилизатор при лечении рака молочной железы [84]
Листья <i>Xanthium strumarium</i> (дурнишник обыкновенный)	ксантострумарин, кверцетин, лютеолин, кемпферол, галловая, хлорогеновая, кофеиновая кислоты, материзин	$H_2PtCl_6 \cdot 6 (H_2O)$	средний размер PtНЧ составил 22 нм, форма частиц кубическая	PtНЧ проявили цитотоксический эффект против раковых клеточных линий HeLa, доказаны <i>in vitro</i> противогрибковая и антибактериальная активность [85]
Листья <i>Croton Caudatus Geisel</i> (хвостатый кротон)	кверцетин, кемпферол, лютеолин, рутин, алкалоиды	$H_2PtCl_6 \cdot 6 (H_2O)$, $HAuCl_4$	средний размер PtНЧ в диапазоне 12–33 нм (кристаллическая природа ГЦК платины подтверждена PCA)	цитотоксическое действие на линии раковых клеток HeLa [86]

Т а б л и ц а 6

Растительные экстракты для синтеза PdНЧ, их состав и характеристика частиц

Растительный экстракт для получения PdНЧ	Основные компоненты в составе экстракта	Прекурсор Pd	Характеристики PdНЧ	Свойства и применение
Полисахарид <i>Synomorium songaricum</i>	β -ситостерин, кампестерин, цинотерпен, пальмитиновая, олеиновая, линолевая кислоты, пролин, аланин, серин	$(C_2H_3O_2)_2Pd$	PdНЧ размером 4,2 нм (рентгенограммы PdНЧ соответствуют ГЦК палладия)	электрохимическое определение уровня глюкозы в крови [87]
Листья <i>Euphorbia thymifolia</i> L. (молочный тимьян)	кверцетин, кемпферол, рутин, галловая, кофеиновая, эллаговая кислоты, цимол, карвакрол, гераниол, линалоол	$PdCl_2$	спектроскопическими методами подтверждено восстановление ионов Pd(II) до Pd^0 (ППР в УФ-видимой области)	каталитическая активность в реакциях кросс-сочетания Штилле и Хиямы [88]

Окончание табл. 6

Растительный экстракт для получения PdНЧ	Основные компоненты в составе экстракта	Прекурсор Pd	Характеристики PdНЧ	Свойства и применение
<i>Salvia hydrangea</i> (шалфей)	цинеол, камфора, вербонен, β-пипен	$\text{Pd}(\text{NO}_3)_2$	PdНЧ имеют сферическую форму, средний размер 10 нм (РСА подтверждает кристаллическую ГЦК структуру палладия)	нанокатализатор при комнатной температуре [89]
Экстракт кукурузы	крахмал	биметаллические НЧ Pd-Fe $[\text{Pd}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2]_3$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	НЧ имеют сферическую форму, средний размер 60–100 нм	катализатор в реакции дегидрохлорирования [90].
Листья <i>Cacumen Platycladi</i>	кверцетин, кемпферол, кумарин, гиперозид, афзелин	биметаллические НЧ Pd+Au HAuCl_4 PdCl_2	сферическая форма с размером (7,4±0,8) нм (РСА подтвердил кристаллическую природу золота и палладия в НЧ)	катализаторы в органическом синтезе [91]

процессов их получения и стабилизации, повышением их активности и расширением возможностей использования возобновляемого природного сырья. Получаемые в этом направлении научные и практические результаты открывают новые воз-

можности для интеграции НЧМ в разные биоактивные и биосовместимые материалы, новые технологические схемы их получения, а также для их использования в ключевых отраслях науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kisimba K., Anand K., Faya M., Kahumba B., Kasumbwe K., Vijayakumar K., Prasad R. // *J. Renewable Mat.* 2023. 11. 1-17 (10.32604/jrm.2023.026159).
- Banjara R., Kumar A., Aneshwari R., Satnami M., Sinha S.K. // *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2024. 22. 100988 (10.1016/j.enmm.2024.100988).
- Kapoor D., Maheshwari N., Soni N., Jain Singhai N., Sharma Dr M., Prajapati B., Yele S., Maheshwari R. // *J. Drug Deliv. Sci. Techn.* 2023. 92. 105307 (10.1016/j.jddst.2023.105307).
- Chaudhary J., Tailor G., Yadav M., Mehta C. // *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2023. 50. 102692 (10.1016/j.bcab.2023.102692).
- Lee S.H., Jun B.-H. // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. 20. 865 (10.3390/ijms20040865).
- Jamkhande P.G., Ghule, N.W. Bamer A.H., Kalaskar M.G. // *J. Drug Delivery Sci. Technol.* 2019. 53. 101174 (10.1016/j.jddst.2019.101174).
- Bahrulolum H., Nooraei S., Javanshir, N., Tarrahimofrad H., Mirbagheri V.S., Easton A.J., Ahmadian G. // *J. Nanobiotechnol.* 2021. 19. 86 (10.1186/s12951-021-00834-3).
- Azadaliyeva M.M. Dzhafarov S.I. Guseynova S.F. et al. // *International Research Journal.* 2021. 12. 114 (10.23670/IRJ.2021.114.12.029).
- Malik M.A., Wani A.H., Bhat M.Y., Siddiqui S., Alamri S.A., Alrumman S.A. // *Frontiers in Microbiology* 2024. 15. 1399331 (10.3389/fmicb.2024.1399331).
- Nakano M., Fujiwara T., Koga N. // *J. Phys. Chem. C* 2016. 120 (16) 8841-8854 (10.1021/acs.jpcc.6b02377).
- Lee E.J., Piao L., Kim, J.K. // *Bull. Korean Chem. Soc.* 2012. 33 (1) 60-64 (10.5012/bkcs.2012.33.1.60).
- Dirba I., Schwöbel C.A., Zintler A., Komissinskiy P., Molina-Luna L., Gutfleisch O. // *Nanoscale advances* 2020. 2 (10) 4777-4784 (10.1039/D0NA00635A).
- Верная О.И., Шабатин В.П., Семенов А.М., Шабатина Т.И. // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия.* 2016. Т. 57. № 6. С. 388 (10.3103/S002713141701014X).
- Рыжкова А.С., Макеева А.А., Верная О.И., Семенов А.М., Бозе А., Шабатина Т.И. // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия.* 2025. Т. 66. № 6. С. 469.
- Singh A., Jha A., Srivastava G., Sarkar P., Gogoi P. // *Int. J. Sci. Technol. Research* 2013. 2 (11). 153-157. ISSN 2277-8616.
- Chandra H., Kumari P., Bontempi E., Yadav S. // *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2020. 24 (101518). 10.1016/j.bcab.2020.101518).
- Singh A., Gautam P.K., Verma A., Singh V., Shivapriya P.M., Shivalkar S., Sahoo A.K., Samanta S.K. // *Bio-*

- technol. Rep. 2020. 25. e00427 (10.1016/j.btre. 2020. e00427).
18. Зеленая химия как инструмент устойчивого развития: учебное пособие / Атласкин А.А., Атласкина М.Е., Воротынцев А.В. и др.; сост. Н.П. Тарасова, А.Г. Ишков, С.О. Гоманова. М., 2024. 292 с. (ISBN 978-5-6046546-6-8).
19. Nagori K., Nakhate K., Yadav K., Thakur A., Ajazuddin M., Pradhan M. // *Inorg. Chem. Commun.* 2024. 171. 113604 (10.1016/j.inoche.2024.113604).
20. Teh H., Lam M., Yee H., Chai L., Wei W., Voon L., Tan I., Sie Y., Cheng W. // *Mat. Today Chem.* 2024. 42 (10.1016/j.mtchem.2024.102389).
21. Ciro C., Stefania P., Rita C., Luca C., Luca R. // *TRAC.* 2024. 173. 117627 (10.1016/j.trac.2024.117627).
22. Arwa A., Shehab E. // *J. Organomet. Chem.* 2025. 1027. 123508 (10.1016/j.jorganchem.2025.123508).
23. Goutam B. // *ChemComm.* 2024. 60 (63). 8153 (10.1039/d4cc02249a).
24. Karmakar R., Mukhopadhyay C. // *Advances in Green and Sustainable Chemistry.* 2024. 1. 305-343 (10.1016/B978-0-443-16166-7.00014-1).
25. Oliveira M.L., Rodrigues L.M., Veiga M.A.M.S, Souza L.R.S. // *GAC.* 2024. 11. 100148 (10.1016/j.greeac.2024.100148).
26. Laura C.R., Roberto R.G., Antonia G.F. // *Adv. Sample Prep.* 2024. 12. 100128 (10.1016/j.sample.2024.100128).
27. Gema C.P., Ruben C., Damian P.Q., Sonia M.Z., Belen G., Lourdes R., Isabel S. // *Microchem. J.* 2024. 207. 111954 (10.1016/j.microc.2024.111954).
28. Ewelina P.N., Monika H., Grzegorz P. // *Food Chem.* 2024. 460. 140456 (10.1016/j.foodchem.2024.140456).
29. Vinothkumar V., Subir K.S., Sreenivasa R.K., Ravi K.M., Tanguturi V.H.M., Satish K.K., Dhurwasulu B. // *Green Chem.* 2024. 26 (3). 1393 (10.1039/d3gc04757a).
30. Amanda S.S., Weuller T.M., Lais M.M., Maria V.P.R., Ana Karine P.B. // *Algal Res.* 2018. 35. 178-184 (10.1016/j.algal.2018.08.015).
31. Phaik C.A., Mohamad N.M.I., Veeradasan P., Rohana A., Daruliza K.M.A., Pandian B.R. // *J. Surf. Interfac.* 2025. 60. 105993 (10.1016/j.surfin.2025.105993).
32. Jessica T.M., Yannick N., Machawe M.M., Themba O.M., Anita E. // *Mater. Today.* 2022. 62 (1). 57 (10.1016/j.matpr.2022.02.088).
33. Farid K., Wafa Z., Lhoussain H., Mohamed B., Laila B., Bachir B., Leila R., Marc P., Gerard L. // *Steroids.* 2024. 212. 109520 (10.1016/j.steroids.2024.109520).
34. Luciana G. Angelini, Silvia T., Daniele A., Manuela B., Roberto M., Luca L. // *Ind. Crop. Prod.* 2015. 75 (B). 51 (10.1016/j.indcrop.2015.04.010).
35. Biplob B., Kartikey D.D., Bhupender K., Raju Chowhan L. // *Arab. J. Chem.* 2022. 15 (3). 103654 (10.1016/j.arabjc.2021.103654).
36. Shahzaib A., Nishat N., Jahan A., Bhat T., Inam A. // *JCIS Open.* 2024. 16. 100125 (10.1016/j.jciso.2024.100125).
37. Teimuri-Mofrad R., Hadi R., Tahmasebi B., Farhoudian S. // *Nanochem. Res.* 2017. 2. 1. 8 (10.22036/NCR.2017.01.002).
38. Elia P., Zach R., Hazan S., Kolusheva S., Porat Z., Zeiri Y. // *Int. J. Nanomed.* 2014. 9. 1. 4007 (10.2147/IJN.S57343).
39. Menka H., Aslam K., Katti K.K., Thipe V.C., Amal Al.-Y., Darsha D., Michael N.B., Ademar B.L., Chetan H.P. // *Sci. Rep.* 2021. 11. 1. 16797 (10.1038/s41598-021-96224-8).
40. Chen J. // *Arab. J. Chem.* 2021. 14. 103000 (10.1016/j.arabjc.2021.103000).
41. Akhtar S. // *Arab. J. Chem.* 2022. 15. 2. 103594 (10.1016/j.arabjc.2021.103594).
42. Sarah Shakir Al-Mafarjy, Nursakinah Suardi, Naser M. Ahmed, Daruliza Kernain, Huda Hisham Alkatib, Mohammed Ali Dheyab. // *Inorg. Chem. Commun.* 2024. 161. 112052 (10.1016/j.inoche.2024.112052).
43. Cheng X., Li D., Cui R. // *J. Eng. Res.* 2023 (10.1016/j.jer.2023.100151).
44. An X., Gao Y., Liu X., Yin Q., Meng L., Wei L. // *Inorg. Chem. Commun.* 2024. 161. 112011 (10.1016/j.inoche.2023.112011).
45. Huang Y., Zhang Y., Zhang Y., Liu W., Fang Y., Motlagh M. // *Environ. Res.* 2023. 238. 2. 117260 (10.1016/j.envres.2023.117260).
46. Hao W., Jia Y., Wang C., Wang X. // *Inorg. Chem. Commun.* 2022. 144. 109931 (10.1016/j.inoche.2022.109931).
47. Dat T.D., Cong C.Q., Nhi T.-Le.H., Khang P.T., Hoai Nam N.T., Tinh N.T., Hue D.T., Hieu N.H. // *Biochem. Eng. J.* 2023. 200. 109103 (10.1016/j.bej.2023.109103).
48. Najlaa S. Al-Radadi, Widad M. Al-Bishri, Neveen A. Salem, Shaimaa A. ElShebiny // *Saudi Pharm. J.* 2024. 2. 2. 101921 (10.1016/j.jsps.2023.101921).
49. Gopalakrishnan V., Singaravelan R. // *Inorg. Chem. Commun.* 2023. 158. 2. 111609 (10.1016/j.inoche.2023.111609).
50. Ali S. Abed, Yousif H. Khalaf, Ahmed M. Mohammed // *Results Chem.* 2023. 5. 100848 (10.1016/j.rechem.2023.100848).
51. Dheyab M.A., Aziz A.A., Al-Mafarjy S.S., Suardi N., Ashikin Nik Ab Razak N.N., Ramizy A., Jameel M.S. // *Inorg. Chem. Commun.* 2023. 157. 111363 (10.1016/j.inoche.2023.111363).
52. Susanna D., Balakrishnan R.M., Ettiyappan J.P. // *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* 2023. 87. 104740 (10.1016/j.jddst.2023.104740).
53. Rokkarukala S., Cherian T., Ragavendran C., Mohanraj R., Kamaraj C., Almoshari Y., Albariqi A., Sultan M.H., Alsalthi A., Mohan S. // *Heliyon.* 2023. 9. 3: e14668 (10.1016/j.heliyon. 2023.e14668).
54. Jorge L. Cholula-Diaz, Diana Lomel Marroquin, Bidhan Pramanick, Alfonso Nieto-Arguello, Luis A. Cantu-Castillo, Hyundoo Hwang // *Colloids Surf. B.* 2018. 163. 1. 329 (10.1016/j.colsurfb.2017.12.051).
55. Premkumar J., Sudhakar T., Abhishek Dhakal, Jeshan Babu Shrestha, Krishnakumar S., Balashanmugam P. // *Biocat. Agricult. Biotech.* 2018. 15. 311 (10.1016/j.bcab.2018.06.005).

56. Siva Sankar Sana, Lakshman Kumar Dogiparthi // *Mater. Lett.* 2018. 226. 1. 47 (10.1016/j.matlet.2018.05.009).
57. Thangaraj S., Perumal K., Kalaiyar S., Kalaiyar R. // *Resource-Efficient Technologies.* 2017. 3. 303 (10.1016/j.refit.2017.01.004).
58. Arunrat K., Sineenat S. // *Mater. Lett.* 2017. 192. 72 (10.1016/j.matlet.2017.01.076).
59. Muthupandian S., Sisir Kumar B., Davoodbasha M., Periyakaruppan P., Arivalagan P. // *Microbial Pathogenesis.* 2018. 116. 221 (10.1016/j.micpath.2018.01.038).
60. Ujjal K.S., Balaprasad A., Sanat K., Animesh H., Pulak D. // *Mater. Today.* 2018. 5. 2321 (10.1016/j.matpr.2017.09.236).
61. Alaknanda J., Adur N., Nandini K., Shilpashree Mayachar, Ramya R., Srinatha N. // *J. Photochem. Photobiol. B.* 2018. 183. 30 (10.1016/j.jphotobiol.2018.04.020).
62. Hitesh, Surabhi Lata // *Mater. Today.* 2018. 5. 6227 (10.1016/j.matpr.2017.12.231).
63. Anu K., Rita S.M., Tejpal D. // *Asian Pac. J. Trop. Dis.* 2016. 6. 3. 223 (10.1016/S2222-1808(15).61018-0).
64. Jayanta S., Arjuara B., Avik M., Santosh K. // *Sustainable Environment Research.* 2017. 27. 245 (10.1016/j.serj.2017.04.003).
65. Majid N., Boroumand M., Montazer F., Simon J., Liesiene Z., Saponjic V.D. // *Appl. Surf. Sci.* 2015. 346. 477 (10.1016/j.apsusc.2015.04.047).
66. Qingxin G., Chanchan X., Wei L. // *Catal. Today.* 2018. 1 (10.1016/j.cattod.2018.05.004).
67. Mamatha R, Shadab Khan, Pooja Salunkhe, Shruti Satpute, Kendurkar S.V., Asmita Prabhune, Animesh Deval, Bhushan Chaudhari // *Mater. Lett.* 2017. 205. 226 (10.1016/j.matlet.2017.06.089).
68. Mythili R., Selvankumar T., Kamala-Kannan S., Sudhakar C., Fuad Ameen, Ahmed Al-Sabri, Selvam K., Govarthanan M., Kim H. // *Mater. Lett.* 2018. 225. 101 (10.1016/j.matlet.2018.04.111).
69. Supakit P., Jongkon S., Abdi W.S., Supayang P.V. // *Mater. Lett.* 2017. 209. 201 (10.1016/j.matlet.2017.07.102).
70. Ping Y., Jun Z., Tieling X., Guoqiang C., Ran T., Kwang-Ho C. // *J. Indust. Eng. Chem.* 2018. 58. 74 (10.1016/j.jiec.2017.09.009).
71. Sithara R., Selvakumar P., Arun C., Anandan S., Sivashanmugam P. // *J. Adv. Res.* 2017. 8. 6. 561 (10.1016/j.jare.2017.07.001).
72. Giri A.K., Jena B., Biswal B., Pradhan A.K., Arakha M., Acharya S., Acharya L. // *Sci. Rep.* 2022. 2 (1). 8383 (10.1038/s41598-022-12484-y).
73. Zubair M., Azeem M., Mumtaz R., Younas M., Adrees M., Zubair E., Khalid A., Hafeez F., Rizwan M., Ali S. // *Environ Pollut.* 2022. 304. 119249 (10.1016/j.envpol.2022.119249).
74. Hazman O., Khamidov G., Yilmaz M., Bozkurt M., Kargioğlu M., Savrık M., Tukhtaev D., Erol I. // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2024. 453. 115601 (10.1016/j.jphotochem.2024.115601).
75. Lopes C.R.B., Courrol L.C. // *J. Lumin.* 2018. 199. 183 (10.1016/j.jlumin.2018.03.030).
76. Muthu Kumara Pandian, Karthikeyan C., Rajasimman M., Dinesh M.G. // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2015. 1 (10.1016/j.ecoenv.2015.03.039).
77. Sahin M., Arslan Y., Soyuçok A. // *Mat. Chem. Phys.* 2023. 314. 128853 (10.1016/j.matchemphys.2023.128853).
78. Yang H., Zhang X., Velu P., Liu X., Vijayalakshmi A. // *Mat. Lett.* 2021. 313. 131645 (10.1016/j.matlet.2021.131645).
79. Liu Z., Ji W. // *Inorg. Chem. Commun.* 2024. 113099 (10.1016/j.inoche.2024.113099).
80. Ansari P., Muthukrishnan R.M., Vedhi C., Kathiresan S., Abdul S. // *Inorg. Chem. Commun.* 2023. 158. 111669 (10.1016/j.inoche.2023.111669).
81. Nagpure A., Mohture V., Kayarkar A. // *Inorg. Chem. Commun.* 2022. 146. 110118 (10.1016/j.inoche.2022.110118).
82. Jayarambabu N., Allam A., Venkatappa R., Tumu R., Kalagadda K.R. // *Mat. Lett.* 2019. 259. 126813 (10.1016/j.matlet.2019.126813).
83. Devaraj M., Saravanan R., Santhanalakshmi J., Agarwal S., Gupta V., Boukherroub R. // *Sens. Actuators B: Chemical.* 2018. 266 (10.1016/j.snb.2018.03.141).
84. Guojun Z., Hongmei Z., Ming S., Lei W., Xiaosan W. // *J. Phys. Chem. Sol.* 2015. 81. 79 (10.1016/j.jpcs.2014.12.012).
85. Charmi J., Seidi F., Amereh M., Ghaffarlou M., Salehiabar M., Yousefnejad S., Barsbay M., Sharafi A., Javani S., Nosrati H. // *Int J Pharm.* 2023. 643. 123148 (10.1016/j.ijpharm.2023.123148).
86. Kumar P., Kala S., Prakash K.S. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2019. 7. 103146 (10.1016/j.jece.2019.103146).
87. Kumar P., Kala S., Prakash K.S. // *Mat. Lett.* 2018. 236 (10.1016/j.matlet.2018.10.025).
88. Piermatti O. // *Catalysts.* 2021. 11. 1258 (10.3390/catal11111258).
89. Nasrollahzadeh M., Sajadi S.M. // *J. Colloid Interface Sci.* 2016. 469. 191 (10.1016/j.jcis.2016.02.024).
90. Khodadadi B., Bordbar M., Nasrollahzadeh M. // *J. Colloid Interface Sci.* 2017. 490. 1 (10.1016/j.jcis.2016.11.032).
91. Dlamini N.G., Basson A.K., Pullabhotla V.S.R. // *Appl. Nano.* 2023. 4 (1). 1 (10.3390/applnano4010001).
92. Zhan G., Huang J., Du M., Abdul-Rauf I., Ma Y., Li Q. // *Mat. Lett.* 2011. 65. 2989 (10.1016/j.matlet.2011.06.079).

Информация об авторах

Татьяна Игоревна Шабатина – зав. лабораторией химии низких температур, вед. науч. сотр. кафедры химической кинетики химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана, докт. хим. наук, доцент (tatyanaashabatina@yandex.ru);

Аниндия Бозе – профессор кафедры фармацевтического анализа факультета фармацевтических наук (SPS) в составе Шикша-О-Анусандхан (SOA) – частного университета в Бхубанешваре, штат Одиша, Индия, докт. медицинских наук (anindyabose_in@yahoo.com; aninyabose@soa.ac.in);

Яна Андреевна Громова – науч. сотр. кафедры химической кинетики химического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, канд. хим. наук (chemyaninka@mail.ru);

Ольга Ивановна Верная – ст. науч. сотр. кафедры химической кинетики химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана, канд. хим. наук (olga_vernaya@mail.ru);

Михаил Яковлевич Мельников – проф., зав. кафедрой химической кинетики химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук (melnikov46@mail.ru).

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

Статья поступила в редакцию 10.05.2025;
одобрена после рецензирования 16.06.2025;
принята к публикации 25.06.2025.