

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 544.77+546.05

ЗЕЛЕНый СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Татьяна Игоревна Шабатина^{1,2}, Аниндья Бозе³, Ольга Ивановна Верная^{1,2},
Яна Андреевна Громова¹, 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 Факультет фармацевтических наук (SPS) в составе Шикша-О-Анусандхан
(SOA) – частного университета в Бхубанешваре, штат Одиша, Индия

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

Аннотация. Активное развитие нанотехнологий и растущий спрос на наноматериалы, в том числе наночастицы оксидов металлов, вызывают необходимость разработки экономичных и экологических методов синтеза. Зеленая химия и основанные на ее принципах методы синтеза являются эффективным решением данной задачи. Они позволяют получать наночастицы оксидов металлов различного состава, структуры, размера с минимальным вредом для окружающей среды. Многообразие методов и реагентов зеленого синтеза позволяет выбрать наиболее экономически выгодные варианты для различных регионов. В обзоре рассмотрены современные методы зеленой химии, используемые для получения и стабилизации наночастиц оксидов металлов: меди, цинка, циркония, железа, титана. Обсуждены их достоинства, недостатки и возможные направления дальнейшего развития. Кроме того, в обзоре описаны свойства и примеры практического применения наночастиц оксидов металлов, полученных с использованием методов зеленой химии.

Ключевые слова: наночастицы оксидов металлов, синтез, зеленая химия, зеленый синтез, применение

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-6-447-468

Сокращения: НЧ – наночастицы; АФК – активные формы кислорода.

Финансирование. Материалы по оксидам цинка и меди получены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 25-43-01023), работы по оксидам железа, циркония и титана выполнены по теме № АААА-А21-121011590090-7 государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Для цитирования: Шабатина Т.И., Бозе А., Верная О.И., Громова Я.А., Мельников М.Я. Зеленый синтез наночастиц оксидов металлов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. Т. 66. № 6. С. 447–468.

SCIENTIFIC REVIEW

GREEN SYNTHESIS OF METAL OXIDE NANOPARTICLES

Tatyana I. Shabatina^{1,2}, Anindya Bose³, Olga I. Vernaya^{1,2}, Yana A. Gromova¹,
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. Active development of nanotechnology and growing demand for nanomaterials, including metal oxide nanoparticles, makes the problem of developing economical and environmentally friendly synthesis methods urgent. Green chemistry and green synthesis methods based on its principles are an effective solution to this problem. These methods can be used to obtain metal oxide nanoparticles with different compositions, structures, sizes with minimal harm to the environment. The variety of green synthesis methods and reagents makes it possible to choose the most cost-effective options for different regions. The review considers modern green chemistry methods used to obtain and stabilize metal oxide nanoparticles: copper, zinc, zirconium, iron, titanium. Their advantages, disadvantages, and possible directions for further development are discussed. In addition, the review describes the properties and practical applications of metal oxide nanoparticles obtained by means of green chemistry methods.

Keywords: metal oxide nanoparticles, synthesis, green chemistry, green synthesis, applications

Abbreviations: NPS – nanoparticles; ROS – active oxygen forms.

Financial Support. The materials on zinc and copper oxides were obtained with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project 25-43-01023), the work on iron, zirconium and titanium oxides was carried out on topic No. AAAAA-A21-121011590090-7 of the state assignment of Lomonosov Moscow State University.

For citation: Shabatina T.I., Bose A., Vernaya O.I., Gromova Ya.A., Melnikov M.Ya. Green synthesis of metal oxide nanoparticles // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2025. T. 66. № 6. S. 447–468.

1. Введение

Зеленая химия – относительно новая область химии, активно развивающаяся в последние десятилетия. Она связана с использованием химических инноваций для достижения экологических и экономических целей одновременно. В основе этого направления лежат 12 принципов, которые в 1998 г. сформулировали Пол Анастас и Джон Уорнер в книге «Зеленая химия: теория и практика» [1]. Первый принцип заключается в предотвращении образования отходов. Он является основным, а остальные принципы дают рекомендации, которых необходимо придерживаться для его выполнения:

«атомная экономия» – построение структуры синтеза и выбор условий синтеза таким образом, чтобы одновременно получить максимальное количество необходимого продукта и минимальное количество отходов;

разработка менее опасных методов химического синтеза;

создание безопасных химических веществ и продуктов;

использование безопасных растворителей и вспомогательных химических веществ или использование наиболее безопасных вариантов;

повышение энергоэффективности – выбор стратегии синтеза с учетом минимизации энергетических затрат;

использование возобновляемого сырья (не нефтепродуктов) сельскохозяйственной продукции или отходов;

снижение количества химических производных, образующихся в ходе синтеза, за счет оптимизации условий синтеза и использования ингибиторов;

использование катализаторов, которые позволяют снизить количество отходов и энергетические затраты за счет изменения механизма процессов;

создание биоразлагаемых химических веществ и изделий;

анализ загрязнений в режиме реального времени (устранение или минимизация побочных продуктов за счет вмешательства в процесс синтеза);

сведение к минимуму возможности аварий за счет разработки и использования более безопасных химических веществ и оптимальных агрегатных состояний реагентов.

Все вышеперечисленные принципы важны и актуальны, но в последние двадцать лет активное развитие получили преимущественно три направления [2]: использование катализаторов; замена традиционных органических растворителей, в частности, использование водных сред и сверхкритического CO_2 ; использование возобновляемых исходных реагентов и стабилизаторов. Развитие последнего направления тесно связано с поиском оптимальных путей синтеза наночастиц

(НЧ) и наноматериалов, которые в последние годы находят новые применения в различных областях: от техники, сельского хозяйства, пищевой промышленности до электроники и медицины. Зеленый синтез – подход к созданию НЧ с использованием живых организмов, таких как бактерии, грибы или растения, вместо токсичных химических реагентов [2]. Широкое распространение получили методы зеленого синтеза, основанные на использовании в химических реакциях в качестве реагентов и стабилизаторов экстрактов растений, так как в отличие от биологических методов синтеза, в которых наноматериалы получают с помощью бактерий и грибов, они не требуют значительных трудовых, временных и энергетических затрат. В то же время многообразие флоры предоставляет многочисленные возможности для развития этого направления.

Внимание к НЧ оксидов металлов связано с их сравнительно невысокой стоимостью и уникальными антибактериальными, магнитными, полупроводниковыми, химическими, адсорбционными и оптическими свойствами. Благодаря этим свойствам НЧ оксидов металлов находят применение в различных областях (рис. 1). Свойства НЧ тесно связаны с их размерно-структурными параметрами, поэтому разработка методов синтеза НЧ оксидов металлов с определенными составом, размером и структурой – одна из актуальных задач для исследователей. Обзор посвящен



Рис. 1. Применение НЧ оксидов металлов

использованию методов зеленого синтеза для получения НЧ оксидов металлов, преимуществам и недостаткам этих методов, возможным путям развития данного направления зеленой химии. Также в обзоре рассмотрены основные существующие и потенциальные возможности применения НЧ оксидов металлов, в том числе полученных методами зеленого синтеза.

2. Методы синтеза наночастиц оксидов металлов.

Для получения НЧ оксидов металлов используют различные физические, химические и биологические методы (рис. 2.). Наибольшее распространение получили химические методы осаждения (соосаждения) и золь-гель метод [3–6]. Они являются высокопроизводительными, экспрессными, не требуют сложного технологического оборудования, отличаются невысокой трудоемкостью. Однако в большинстве случаев они подразумевают использование токсичных и неэкологичных реагентов и растворителей. Метод осаждения (соосаждения) основан на выделении из раствора продуктов химического взаимодействия или их предшественников в виде малорастворимых гидроксидов, карбонатов, оксалатов и других нерастворимых соединений с последующим термическим разложением последних. Золь-гель метод основан на форми-

ровании структурированной каркасной коллоидной системы (геля) из коллоидного раствора прекурсора (золя). Старение, высушивание и отжиг гелей позволяют получить высокодисперсные порошки и покрытия на основе НЧ. Стадия отжига необходима для удаления органических составляющих, участвующих в гелеобразовании, а также для формирования НЧ оксидов из соединений-предшественников.

Меньшее распространение получил сольвотермальный метод синтеза НЧ оксидов металлов [3–6], в котором формирование конечных продуктов или их прекурсоров протекает в автоклавах при высоких давлении и температуре. В основе этого метода синтеза лежит высокая растворимость большого количества неорганических веществ в растворителях при повышенных температуре и давлении и возможность последующей кристаллизации растворенного материала из жидкой фазы. Высокая температура способствует быстрому зародышеобразованию. Частным случаем сольвотермального синтеза является гидротермальный синтез, который предполагает использование в качестве растворителя воды.

НЧ оксидов металлов получают термическим разложением криомодифицированных солей металлов [7–8] или при впрыскивании растворов-предшественников в пламя [9]. Также для



Рис. 2. Методы получения НЧ оксидов металлов

получения НЧ оксидов металлов используют физические и физико-химические методы, такие как измельчение или твердофазные химические реакции в шаровых мельницах и лазерная абляция [4–6, 10]. Однако эти методы связаны с использованием неэкологичных реагентов и требуют высоких энергетических затрат. Стоимость необходимого оборудования также снижает их экономическую привлекательность. Посредством биоминерализации некоторые живые организмы способны получать магнитные частицы, например НЧ магнетита [5]. При анаэробном синтезе в лаборатории в условиях, аналогичных условиям обитания бактерий, могут быть получены однородные частицы с диаметром ядра от 20 до 45 нм. Однако этот метод получения наноматериалов не нашел широкого применения в силу больших временных, трудовых и финансовых затрат на создание оптимальных условий для микроорганизмов, а также в связи со сложностью отделения НЧ от бактериального белкового покрытия.

3. Зеленый синтез наночастиц оксидов металлов

Экологически безопасные методы зеленого синтеза активно используют для получения НЧ оксидов металлов. В данном случае эти методы являются производными от золь-гель метода. Методики зеленой химии позволяют сохранить преимущества этого метода синтеза оксидных наноматериалов (одного из наиболее эффективных), добавив к ним использование экологичных, возобновляемых реагентов и стабилизаторов. Несмотря на то, что спиртовые растительные экстракты содержат больше компонентов для получения НЧ оксидов металлов чаще используют водные экстракты в силу их большей экологичности.

В случае методов зеленого синтеза растительные экстракты или иные природные материалы взаимодействуют с солями металлов с образованием геля-предшественника. Высушивание и отжиг последнего приводит к формированию высокодисперсного оксидного материала. Однако в ряде описанных в литературе синтезов используют менее экологичный вариант – образование геля происходит при добавлении растительного экстракта в коллоидный раствор предшественника, полученный осаждением растворимой соли металла раствором щелочи или аммиаком. В этом случае при отжиге высушенного геля происходит терми-

ческое разложение гидроксида металла до его оксида. Протекание синтеза по более или менее экологичному сценарию зависит от природы используемых реагентов, их соотношения, температуры, а также наличия иных воздействий (перемешивание, ультразвук, изменение pH). Зеленый синтез НЧ оксида железа, описанный в большинстве литературных источников требует наличия химического осадителя. Для оксидов цинка, титана, циркония, меди уже подобраны условия формирования геля, позволяющие получать НЧ без включения в синтез неэкологичной стадии осаждения (таблица).

Состав растительных экстрактов и содержание активных компонентов в них различны, что способствует формированию НЧ разного размера. Однако не только эти параметры оказывают влияние на размер и состав НЧ оксидов металлов, полученных методом зеленого синтеза. Необходимо также учитывать условия формирования геля (температуру формирования и высушивания, время старения, наличие перемешивания) и температуру его отжига. Разнообразие используемых методик формирования гелей-предшественников пока не дает возможность четко связать состав растительного экстракта с размерными параметрами формирующихся частиц оксидов металлов. Кроме того, диапазон методов, используемых для характеристики НЧ, обычно мал и полученные результаты не всегда сопоставимы, что также осложняет выбор оптимальных реагентов для получения частиц оксидов металлов определенного размера.

3.1. Оксид цинка (ZnO)

Оксид цинка – полупроводник *n*-типа, для которого характерна широкая запрещенная зона (~3,37 эВ) и большая энергия связи экситона (60 мэВ) [11, 12]. Уникальные полупроводниковые, оптические, электрические, фотокаталитические и антибактериальные свойства НЧ оксида цинка, а также их высокая биосовместимость, низкая токсичность и экологичность позволяют найти им применение в различных областях: электронике, оптике, катализе, фармакологии, косметологии, медицине, пищевой промышленности и сельском хозяйстве [13]. Оксид цинка при нормальных условиях кристаллизуется преимущественно в гексагональной структуре вюрцита, где атомы цинка находятся в центре тетраэдров, образованных атомами кислорода.

Нехватка питьевой воды в ряде регионов мира и массовое загрязнение водных ресурсов

промышленными отходами привлекают внимание к проектам по рекультивации, очистке и повторному использованию сточных вод. НЧ ZnO являются экономически выгодными и эффективными катализаторами фотодеградация органических соединений-загрязнителей с низкой биоразлагаемостью [14–17]: алканов, ароматических углеводородов, азокрасителей и пестицидов. Высокая химическая и термическая стабильность, хорошие адсорбционные свойства по отношению к органическим и неорганическим загрязнителям (ионам тяжелых металлов) водных ресурсов, высокая фотокаталитическая активность в реакциях разложения красителей делают их перспективными компонентами водоочистных систем [17].

Согласно ряду исследований, НЧ ZnO обладают способностью в качестве внекорневого удобрения увеличивать урожайность продовольственных культур и способствовать их здоровому росту [12, 18–20]. Включение НЧ ZnO в состав полимерных упаковочных материалов позволяет увеличивать сроки хранения продуктов питания, так как они обладают антибактериальной и антиоксидантной активностью в отношении бактериальных штаммов *Escherichia coli* и *Lactobacillus mononucleus* [12, 21]. Их включение в состав упаковки позволяет подавить рост патогенных микроорганизмов в продуктах питания, а также замедлить их распространение, прикрепление и колонизацию, способствуя росту эффективности и сроков хранения. НЧ ZnO наравне с НЧ меди и НЧ CuO рассматривают как более дешевую замену НЧ серебра в составе упаковочных полимерных материалов.

УФ-поглощающие и антибактериальные свойства НЧ ZnO в сочетании с высокой биосовместимостью и низкой токсичностью обуславливают их активное использование в фармакологии и косметологии в составе косметических средств и лекарственных композиций. Эти частицы активны в отношении широкого спектра микроорганизмов: бактерий, вирусов и грибов [20–24]. Они подавляют рост патогенных микроорганизмов, устойчивых к антибиотикам, а также способны повышать эффективность антибактериальных препаратов [25–26]. Их бактерицидное действие обусловлено несколькими механизмами, связанными с образованием активных форм кислорода (АФК) при воздействии света и разрушением мембран микробных клеток. Способность НЧ ZnO поглощать УФ-излучение используют для создания материалов и

косметических средств, защищающих от воздействия ультрафиолета [21–22].

Благодаря своей селективной цитотоксичности по отношению к злокачественным клеткам *in vitro* НЧ ZnO показали многообещающие результаты в противоопухолевой терапии. Увеличивая выработку АФК при действии света, они способствуют апоптозу раковых клеток. Нейтральные гидроксильные группы, присоединенные к НЧ ZnO в кислой среде, протонируются с образованием ZnOH_2^+ на поверхности частицы. Мембраны раковых клеток имеют отрицательный потенциал за счет содержания анионных фосфолипидов, таких как фосфатидилсерин. НЧ ZnO, обладая положительным зарядом, лучше взаимодействуют с раковыми клетками, увеличивая клеточную абсорбцию, цитотоксичность и фагоцитоз. Исследования показали, что НЧ ZnO безвредны для зрелых дермальных фибробластов человека и артериальных эндотелиальных клеток, но повреждают опухолевые клетки [27].

Возможность использования НЧ ZnO активно рассматривается в биосенсорике благодаря их оптическим и фотолюминисцентным свойствам. На основе НЧ ZnO разработаны системы детекции бактериальных клеток (*Salmonella spp.*), лейкозных клеток человека, ократоксина, хорионического гонадотропина [28].

Благодаря широкой запрещенной зоне ZnO является перспективным материалом для применения в оптоэлектронике [29, 30]. ZnO используют в производстве устройств для улучшения электрических контактов. НЧ оксида цинка используют для создания слоев, участвующих в переносе электрона в органических солнечных элементах [31]. Наноструктурированный оксид цинка находит применение как широкозонный полупроводник в устройствах нано- и оптоэлектроники [31].

Для зеленого синтеза НЧ ZnO используют экстракты различных растений. В зависимости от условий синтеза (природы экстракта или температуры формирования и отжига геля) могут быть получены НЧ разного размера (таблица).

3.2. Диоксид титана (TiO_2)

Наноматериалы на основе диоксида титана (TiO_2) привлекают исследователей своей сравнительно невысокой стоимостью, высокой прочностью и химической стабильностью, высоким показателем преломления. TiO_2 является широкозонным полупроводником *n*-типа. Ширина его запрещенной зоны зависит от по-

лиморфной модификации и составляет 3,02, 3,2 и 2,96 эВ для рутила, анатаза и брукита соответственно. Элементарная ячейка кристалла TiO_2 всех трех полиморфных модификаций состоит из атома титана (Ti^{4+}), окруженного шестью атомами кислорода (O^{2-}) в искаженной конфигурации октаэдра. Все эти модификации различаются степенью искажения и схемой расположения элементарных ячеек относительно друг друга. Решетка анатаза имеет тетрагональную структуру и состоит из соединенных вершинами октаэдров TiO_6 . В рутите октаэдры соединены ребрами, что также соответствует тетрагональной структуре кристаллической решетки. В бруките с орторомбической структурой TiO_6 соединены как ребрами, так и вершинами октаэдров. Все полиморфные модификации оксида титана устойчивы при стандартных условиях.

НЧ диоксида титана находят применение в электронике в качестве фотокатализаторов очистки сточных вод и воздуха, а также в медицине для проведения фототермической терапии рака. Пигмент на основе диоксида титана используют при изготовлении солнечных панелей [32]. Химическое производство энергии путем преобразования солнечной энергии рассматривается как одна из экологических стратегий для решения энергетических проблем. Оксид титана является фотокатализатором разложения воды под действием солнечного света с выделением водорода [33–35].

НЧ TiO_2 включают в состав упаковочных материалов, так как в сочетании с УФ-излучением за счет образования АФК они способны подавлять рост и препятствовать распространению колоний микроорганизмов (*E. coli*, *L. monocytogenes*). Способность производить АФК нашла применение в фотодинамической терапии для лечения широкого спектра заболеваний – от псориаза до рака. НЧ TiO_2 рассматривают в качестве фотосенсибилизирующих агентов при лечении злокачественных опухолей, а также при фотодинамической инаktivации резистентных к антибактериальным препаратам бактерий [36].

Благодаря способности поглощать УФ-излучение НЧ TiO_2 включают в солнцезащитные косметические средства. Ряд публикаций посвящен рекультивации загрязненной почвы с помощью НЧ TiO_2 . Метод основан на УФ-деградации органических загрязнителей почвы [35, 37]. Как и оксид цинка, диоксид титана используют в ка-

честве фотокатализатора при очистке сточных вод [38]. Ведутся работы по созданию на его основе систем очистки воздуха [39–40].

Зеленый синтез дает возможность получать НЧ TiO_2 разного размера с использованием возобновляемых реагентов (таблица). Кроме того, преимуществом данного метода синтеза является формирование НЧ TiO_2 только со структурой анатаза, в то время как частицы, полученные классическим золь-гель методом, могут содержать и другие полиморфные модификации TiO_2 [41–42].

3.3. Оксид циркония (IV) (ZrO_2)

Оксид циркония (IV) имеет большую запрещенную зону (~5,5 эВ), низкий коэффициент поглощения, высокий показатель преломления (2,1–2,2). ZrO_2 является полупроводником *p*-типа, обладает высокой диэлектрической проницаемостью и хорошей термической стабильностью. Существуют три полиморфные модификации оксида циркония (IV): моноклинная (*m-ZrO*₂), тетрагональная (*t-ZrO*₂) и кубическая (*c-ZrO*₂), однако при комнатной температуре (и до 1100 °С) стабильна лишь модификация *m-ZrO*₂.

Благодаря своим оптическим свойствам оксид циркония (IV) находит применение в составе интерференционных фильтров, оптических датчиков, зеркал с высокой отражательной способностью и различных оптических компонент. Кроме того, его используют в электронике в качестве диэлектрика затвора [43]. НЧ оксида циркония обладают антибактериальными, противогрибковыми, антиоксидантными и противораковыми свойствами. Они входят в состав костных имплантов, солнечных, топливных и огнеупорных элементов, находят применение в стоматологии, фотокатализе. Их используют в качестве противомикробных, противоопухолевых и антиоксидантных агентов, нанопорошковых наполнителей, сырья для спекания [44]. ZrO_2 считается перспективным материалом для использования в составе керамики, а также оптимальным антикоррозионным покрытием благодаря его хорошей химической стабильности, высокой прочности и отличным характеристикам при высокой температуре [45]. НЧ ZrO_2 и НЧ $\text{ZrO}_2/\text{CuO-ZnO}$ проявляют противодиабетическую активность, так как способны ингибировать α -амилазу [46].

Для получения НЧ и наноматериалов на основе оксида циркония используют методы зеленого синтеза на основе различных природных материалов. Размерно-структурные параметры конечного

продукта, возможные применения и условия синтеза обобщены в таблице.

3.4. Оксиды меди (I, II) (Cu_2O , CuO)

Медь образует два оксида Cu_2O , CuO со степенью окисления металла +1 и +2 соответственно. Эти оксиды являются полупроводниками *p*-типа с запрещенными зонами 1,2–2,1 эВ (CuO) и 2,0–2,6 эВ (Cu_2O). Тенорит (CuO) имеет моноклинную кристаллическую структуру, в которой атом меди координируется 4 атомами кислорода в плоскостной конфигурации, близкой к квадратной. Будучи полупроводником *p*-типа с узкой запрещенной зоной, оксид меди (II) характеризуется исключительной электро- и теплопроводностью, а также высокой степенью стабильности. Cu_2O имеет кубическую структуру, в которой атомы меди и кислорода размещены в гранецентрированных кубических и объемно-центрированных кубических подрешетках соответственно. Благодаря высокому коэффициенту поглощения и ширине запрещенной зоны оксид меди (I) находит применение в качестве абсорбирующего вещества для солнечных батарей.

В последнее время число работ, посвященных синтезу и определению свойств материалов на основе НЧ оксидов меди значительно выросло в последние годы, поскольку их электрические и оптические свойства позволяют усовершенствовать солнечные батареи и технологические устройства, создавать биосенсоры. Оксиды меди являются недорогими катализаторами (например, для восстановления нитратов до аммиака [47]) и антибактериальными агентами [48]. Для НЧ CuO характерна противодиабетическая, антиоксидантная, противовоспалительная и противоопухолевая активность [49]. Фотокаталитические свойства оксидов меди обуславливают возможность их использования при очистке сточных вод от красителей [49].

Синтез оксидов меди (I и II) может быть проведен с использованием недорогих и экологичных методов зеленого синтеза (таблица). Причем зеленая химия позволяет получать как устойчивый оксид меди (II), так и оксид меди (I) с промежуточной степенью окисления. Частичное восстановление Cu^{2+} , вероятно, происходит за счет восстановительной атмосферы (CO), которая образуется при разложении органических компонентов экстракта на воздухе.

3.5. Магнетит (Fe_3O_4) и маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

Магнетит и маггемит имеют структуру обращенной шпинели, в которой анионы кисло-

рода образуют гранецентрированную подрешетку. В случае магнетита одну восьмую имеющих тетраэдрических позиций занимают трехвалентные катионы железа. Половину имеющих октаэдрических позиций занимают в произвольном порядке двух- и трехвалентные катионы железа. Если рассмотреть элементарную ячейку маггемита 64/3 ионов Fe^{3+} распределены между 8 тетраэдрическими и 16 октаэдрическими позициями, а 8/3 октаэдрических позиций вакантны. Эти оксиды железа являются ферромагнетиками, однако при снижении размера частиц до размера менее одного магнитного домена (20–30 нм) они переходят в суперпарамагнитное состояние. В отсутствие внешнего магнитного поля намагниченность суперпарамагнитных НЧ оказывается в среднем равной нулю. Внешнее магнитное поле способно намагничивать суперпарамагнитные НЧ подобно парамагнетикам. Однако их магнитная восприимчивость намного больше, чем у парамагнетиков.

Благодаря низкой стоимости, экологичности, стабильности, низкой токсичности, ферромагнитным или суперпарамагнитным свойствам НЧ магнетита и маггемита находят применение в различных областях от электротехники и химической промышленности до медицины. НЧ магнетита и маггемита являются катализаторами алкилирования по Фриделю – Крафтсу, синтеза имидазола, альдольной конденсации, гидроборирования алкинов и ряда других процессов [50, 51]. НЧ магнетита могут адсорбировать токсичные металлы, нефтепродукты или другие вредные вещества из воды, почвы или воздуха. На основе НЧ магнетита и маггемита развивают методы магнитной сепарации различных биологических объектов (белков, нуклеиновых кислот, антигенов, бактерий) и химических соединений. В последние годы НЧ магнетита и маггемита находят все большее применение в биомедицинских приложениях. На основе этих магнитных оксидов железа разрабатывают агенты для магнитно-резонансной томографии и магнитной гипертермии. Они являются перспективными носителями и векторами в системах направленной доставки лекарственных веществ [5, 52]. Среди большого разнообразия методов синтеза НЧ оксидов железа особое место занимают методы зеленого синтеза, которые в зависимости от природы реагентов и условий проведения процесса позволяют получать НЧ разного размерного диапазона (таблица). Для получения наночастиц магнетита используют разновидность зеленого синтеза, предполагающую использование осадителей – водного раствора щелочей или аммиака. Возможно,

Зеленый синтез НЧ оксидов металлов: условия синтеза, размерно-структурные параметры и применение

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
ZnO			
<i>Acanthus sennii</i> (листья, водный экстракт; флавоноиды, антоцианин), Zn(NO ₃) ₂ , NaOH [13, 53]	старение геля (24 ч), высушивание (80 °С), отжиг (450 °С, 2 ч)	РФА $d_{\text{ср.}} = 19\text{--}24$ нм ПЭМ 17–200 нм	катализатор фоторазложения, модифицирование электродов
<i>Platanus orientalis</i> (листья, водный экстракт; флавоноиды, фенольные соединения, органические кислоты), Zn(NO ₃) ₂ [54, 55]	перемешивание (25–55 °С; 0,5–5,5 ч) отжиг (500 °С, 10 ч)	РФА $d_{\text{ср.}} = 23\text{--}24$ нм ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 38$ нм УФ $\lambda = 346\text{--}362$ нм	катализатор фоторазложения
<i>Syzygium Cumini</i> (листья, водный экстракт; флавоноиды, фенольные кислоты), ацетат цинка, этанол [56, 57]	перемешивание реагентов 2 ч, высушивание (50 °С, 2 ч), отжиг (500 °С, 4 ч)	РФА $d_{\text{ср.}} = 10\text{--}13$ нм УФ $\lambda = 370$ нм	катализатор фоторазложения
Апельсин (кожура, водный экстракт; эфирные масла, флавоноиды, стероиды, терпеноиды), Zn(NO ₃) ₂ [58, 59]	перемешивание реагентов (60 мин), водяная баня высушивание (150 °С), отжиг (400–900 °С, 1 ч)	ПЭМ 400 °С 35–60 нм, 700 °С 70–100 нм, 900 °С 200–300 нм РФА 400 °С, $d_{\text{ср.}} = 24$ нм, 700 °С, $d_{\text{ср.}} = 55$ нм, 900 °С, $d_{\text{ср.}} = 95$ нм	антибактериальная активность: <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>
Апельсин (кожура, водный экстракт; эфирные масла, флавоноиды, стероиды и терпеноиды), Zn(NO ₃) ₂ [60]	перемешивание реагентов (2 ч), центрифугирование, высушивание (60 °С), отжиг (350 °С)	РФА $d_{\text{ср.}} = 3$ нм УФ $\lambda = 348$ нм ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 4$ нм	антибактериальная активность: <i>P. aeruginosa</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i>
<i>Cayratia pedata</i> (листья, водный экстракт; танины, флавоноиды, терпеноиды, алкалоиды, углеводы, сапонины, стероиды, хинины, фенолы, белки, кумарины и флобатанины), Zn(NO ₃) ₂ [61, 62]	перемешивание реагентов (65 °С, 20 мин), высушивание (60 °С, 3 дня), отжиг (400 °С, 2 ч)	РФА 42–60 нм УФ $\lambda = 320$ нм,	иммобилизация глюкозооксидазы
<i>Ruellia tuberosa</i> (листья, водный экстракт; фенолы, флавоноиды, сапонины, дубильные вещества, стероиды и терпеноиды), ZnSO ₄ , NaOH [63, 64]	высушивание (pH 12, 80 °С)	ПЭМ 30–50 нм УФ $\lambda = 320$ нм	антибактериальная активность: <i>E. coli</i> , <i>S. Aureus</i> ; Катализатор фоторазложения

Продолжение таблицы

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
<i>Phoenix roebelenii</i> (листья, водный экстракт; фенолы, органические кислоты, флавоноиды), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ [65, 66]	старение геля (20 ч), отжиг осадка (500 °C, 2 ч)	РФА $d_{\text{ср.}} = 11$ нм ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 15$ нм	антибактериальная активность: <i>S. aureus</i> , <i>S. pneumoniae</i> , <i>E. coli</i> , <i>S. typhi</i> ; катализатор фоторазложения
<i>Cassia auriculata</i> (листья, водный экстракт; флавоноиды, фенолы), ацетат цинка, NaOH [67, 68]	перемешивание реагентов (pH 12, 2 ч), старение геля (12 ч), высушивание (60 °C) отжиг (400 °C, 30–120 мин)	РФА $d_{\text{ср.}} = 24\text{--}30$ нм УФ $\lambda = 376$ нм	антибактериальная активность: <i>B. subtilis</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>P. mirabilis</i> .
<i>Brassica oleracea</i> (листья, водный экстракт; алкалоиды, флавоноиды, терпеноиды, фенолы, дубильные вещества, сапонины), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ [69, 70]	высушивание (70 °C, 3 ч) отжиг (400 °C, 1 ч)	РФА $d_{\text{ср.}} = 52$ нм УФ $\lambda = 311$ нм,	катализатор фоторазложения, антибактериальная активность: <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>E. coli</i>
<i>Cinnamomum tamala</i> (этанольный экстракт; алкалоиды, терпены, флавоноиды, танины, полифенолы и сапонины), ацетат цинка, NaOH [71, 72]	высушивание (pH 8, 80 °C), отжиг (200 °C)	РФА $d_{\text{ср.}} = 38$ нм ПЭМ 50–60 нм УФ $\lambda = 265$ нм	катализатор фоторазложения
<i>Parthenium hysterophorus</i> (листья, водный экстракт; алкалоиды, танина, сапонины, сахара, стероиды, терпеноиды), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ [73, 74]	перемешивание (90 °C, 800 об/мин, 8 ч), отжиг (400 °C, 3 ч)	ПЭМ 5–10 нм УФ $\lambda = 380$ нм	антибактериальная активность: <i>E. coli</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>S. aureus</i> , <i>S. pneumoniae</i> , <i>C. albicans</i> ; удобрение для растений
<i>Raphanus sativus</i> (листья, водный экстракт; флавоноиды, алкалоиды, танины, гликозиды, протеины), ацетат цинка, NaOH [75]	pH 8, 10, 12, и 14; 70 °C, 1 ч, перемешивание (2 ч), высушивание (60 °C)	DLS 209 нм РФА $d_{\text{ср.}} = 66$ нм УФ $\lambda = 370$ нм	противоопухолевая активность (на клетках A549)
<i>Fumaria officinalis</i> (FO) (водный экстракт; углеводы, сапонины, флавоноиды, фитостерины, дубильные вещества и фенольные соединения), <i>Peganum harmala</i> (PH) (водный экстракт; сапонины, флавоноиды, алкалоиды), ацетат цинка [76–77]	перемешивание (60 °C, 2 ч), центрифугирование, высушивание (100 °C), отжиг (100–500 °C, 2 ч)	РФА $d_{\text{ср.}} = 20$ нм (FO) $d_{\text{ср.}} = 25$ нм (PH) УФ $\lambda = 294$ нм (FO) $\lambda = 303$ нм (PH)	антибактериальная активность: <i>S. aureus</i> , <i>C. michiganensis</i> ; антиоксидантная активность

Продолжение таблицы

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
<i>Myristica fragrans</i> (фрукты, водный экстракт; флавоноиды, сапонины, алкалоиды, гликозиды, антрахиноны), $Zn(NO_3)_2$ [78, 80]	перемешивание (60 °C 2 ч), центрифугирование, высушивание (90 °C), отжиг (500 °C, 2 ч)	DLS 66 нм РФА $d_{cp.} = 41$ нм ПЭМ 43–83 нм	антидиабетическая, антиоксидантная, антибактериальная активность: <i>E. coli</i> , <i>K. pneumoniae</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>S. aureus</i> ; катализатор фоторазложения
<i>Deverra tortuosa</i> (надземная часть растения, водный экстракт; фенолы, терпены, кумарины, стеринны, эфирные масла), $Zn(NO_3)_2$ [81, 82]	высушивание (60 °C, 1 ч), отжиг (400 °C, 2 ч)	ПЭМ 9–31 нм УФ $\lambda = 374$ нм	противоопухолевая активность A549, WI38
<i>Coffea arabica</i> (листья, кофе, водный экстракт; эхиноиды, флавоноиды, ксантоны, кофеин), гидроксинитрит цинка [83, 84]	перемешивание (80 °C), высушивание (120–150 °C, 2 ч)	РФА $d_{cp.} = 40$ нм УФ $\lambda = 360$ нм	нет информации
<i>Hardwickia binata</i> (листья, водный экстракт; фенолы, сапонины, флавоноиды, гликозиды, дубильные вещества, углеводы, белки, аминокислоты, стероиды, липиды, хиноны, эфирные масла, жиры), ацетат цинка, NaOH [85, 86]	pH 13, центрифугирование, высушивание (60 °C), отжиг (350 °C, 3 ч)	ПЭМ $d_{cp.} = 25$ нм УФ $\lambda = 365$ нм,	антибактериальная активность: <i>E. faecalis</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aureginosa</i>
<i>Salvia officinalis</i> (листья, водный экстракт; полифенолы, флавоноиды), $Zn(NO_3)_2$, NaOH [87, 88]	перемешивание (50 °C, pH 12), высушивание (80 °C), отжиг (400 °C, 2 ч)	РФА $d_{cp.} = 12$ нм ПЭМ 15–35 нм УФ $\lambda = 368$ нм	катализатор фоторазложения, противогрибковая активность <i>S. officinalis</i>
<i>Dysphania ambrosioides</i> (листья, водный экстракт; флавоноиды, кумарины, жирные кислоты), $Zn(NO_3)_2$ [89, 90]	перемешивание (60 °C, 6 ч), центрифугирование, высушивание (50 °C), отжиг (400 °C, 2 ч)	РФА $d_{cp.} = 8$ нм ПЭМ $d_{cp.} = 15$ нм	антибактериальная активность: <i>S. aureus</i> , <i>S. epidermidis</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>A. actinomycetemcomitans</i> , <i>P. gingivalis</i> , <i>P. intermedia</i> , <i>S. mutans</i> , <i>S. sanguinis</i>
<i>Erythrina variegata</i> (листья, водный экстракт; алкалоиды, флавоноиды, стероиды, терпеноиды, сапонины, танины, сахара, гликозиды, терпеноиды), $Zn(NO_3)_2$ [91, 92]	перемешивание (70 °C, 2–3 ч), высушивание (80 °C, 12 ч), отжиг (450 °C, 2–3 ч)	DLS 25–35 нм РФА $d_{cp.} = 29–57$ нм ПЭМ 15–30 нм УФ $\lambda = 358$ нм	антибактериальная активность: <i>S. typhi</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i> , антиоксидантная, противовоспалительная, антидиабетическая активность

Продолжение таблицы

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
<i>Pelargonium odoratissimum</i> (листья, водный экстракт; монотерпены, сесквитерпены, полифенолы), ацетат цинка [93]	перемешивание (50 °C), центрифугирование, высушивание (100 °C), отжиг (600 °C, 2 ч)	DLS 76 нм РФА $d_{\text{ср.}} = 14$ нм, ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 34$ нм УФ $\lambda = 370$ нм	антибактериальная активность: <i>B. cereus</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i>
TiO ₂			
<i>Acorus calamus</i> (листья, водный экстракт; флавоноиды, алкалоиды, фенолы, дубильные вещества, стероиды, сапонины, гликозиды и терпеноиды), изопропоксид титана (IV), NH ₃ *H ₂ O [94, 95]	высушивание (50 °C), отжиг (600 °C, 3 ч)	DLS 38–59 нм РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 39$ нм СЭМ 11–30 нм	катализатор фоторазложения Антибактериальная активность: <i>P. aeruginosa</i> , <i>E. coli</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i>
<i>Tinospora cordifolia</i> (надземная часть, водный экстракт; дитерпеноидные лактоны, гликозиды, стероиды, сесквитерпеноиды, фенолы, алифатические соединения, эфирные масла, смесь жирных кислот и полисахаридов), изопропоксид титана (IV) [96, 97]	перемешивание (50 °C, 4 ч), отжиг 400 °C	РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 25$ нм УФ $\lambda = 288$ нм	антибактериальная активность: <i>E. coli</i> ; катализатор фоторазложения
<i>Calotropis gigantea</i> (листья – Л, цветки – Ц, семена – С) (водный экстракт; листья: алкалоиды, стероиды, терпеноиды, флавоноиды, танины, фенолы), изопропоксид титана (I V), NH ₃ *H ₂ O [98, 99]	высушивание (рН 12, 60 °C), отжиг (400 °C, 3 ч)	Л: РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 7$ нм, ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 12$ нм Ц: РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 11$ нм, ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 32$ нм С: РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 10$ нм ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 18$ нм	катализатор фоторазложения, солнечные батареи
Лимонная цедра (фенолы, каротиноиды, витамины, эфирные масла), Ti порошок [100, 101]	перемешивание (5 ч, 10 об/с), центрифугирование, отжиг (500 °C, 2 ч)	РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 62$ нм СЭМ 80–140 нм ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 100$ нм,	катализатор фоторазложения

Продолжение таблицы

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
<i>Piper betel</i> (PB) (водный экстракт; сапонины, эвгенол, танины, полифенолы, флавоноиды, алкалоиды, стероиды, сапонины), <i>Ocimum tenuiflorum</i> (OT) (водный экстракт; танины, флавоноиды, эвгенол, кариофиллены, камфора), <i>Moringa oleifera</i> (MO) (алкалоиды, флавоноиды, антрахиноны, витамины, гликозиды, терпены), <i>Coriandrum sativum</i> (CS) (водный экстракт; фенолы, гликозиды, флавоноиды, сахара, белки, алкалоиды), изопропоксид титана (IV) [41]	перемешивание (70 °C, 3 ч), отжиг (400 °C, 3 ч)	PB: РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 6,4$ нм ПЭМ 6–9 нм OT: РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 7$ нм ПЭМ 6–9 нм. MO: РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 6,6$ нм, ПЭМ 6–9 нм CS: РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 6,8$ нм ПЭМ 6–9 нм	катализатор фоторазложения
<i>Terminalia Catappa</i> (фрукты; фенолы, танины, флавоны, флавонолы, флавоноиды, тритерпеновые стеринны), <i>Carissa Carandas</i> (фрукты; углеводы, липиды, белки и фенолы), изопропоксид титана (IV), этанол [102]	перемешивание (80 мин), отстаивание (24 ч), высушивание (60 °C), отжиг (450 °C, 2 ч)	<i>Terminalia Catappa</i> : РФА анатаз 8–21 нм <i>Carissa Carandas</i> РФА анатаз 8–21 нм	нет информации
<i>Malva parviflora</i> (листья, водный экстракт; фенольные кислоты, флавоноиды, жирные кислоты, производные хлорофилла и каротиноиды), TiCl_4 , $\text{N}_2\text{H}_4\text{CS}$, $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [103, 104]	старение геля (60 °C, 24 ч), отжиг (400 °C, 3 ч)	РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 30$ нм	катализатор фоторазложения
<i>Trianthema portulacastrum</i> (фенольные соединения, флавоноиды, антиоксидантные ферменты), <i>Chenopodium quinoa</i> (листья; полифенолы, фитостерины и флавоноиды), изопропоксид титана (IV) [105, 106]	отжиг (450 °C, 4 ч)	РФА анатаз 6–8 нм	сельское хозяйство, защитный препарат

Продолжение таблицы

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
<i>Citrus limetta</i> (листья, водный экстракт; каротиноиды, флавоноиды, терпены, лимонин), бутадиол титана [107]	перемешивание 5 ч, старение геля 24 ч, высушивание (150 °C, 2 ч), отжиг (550 °C, 2 ч)	РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 45$ нм ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 80$ нм	катализатор фоторазложения
<i>Wrightia tinctoria</i> (листья, водный экстракт; алкалоиды, тритерпеноиды, стероиды, флавоноиды, липиды и углеводы), изопропоксид титана (IV) [108, 109]	излучение в микроволновом диапазоне, отжиг (500 °C, 5 ч)	DLS 119 нм РФА анатаз $d_{\text{ср.}} = 10$ нм, ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 20$ нм, УФ $\lambda = 348$ нм	катализатор фоторазложения; антибактериальная активность: <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i>
ZrO_2			
<i>Murraya koenigii</i> (листья, водный экстракт; алкалоиды, флавоноиды, углеводы и стероиды), $\text{Zr}(\text{NO}_3)_4$ [110, 111]	перемешивание (60 мин), центрифугирование, высушивание (100 °C)	РФА $d_{\text{ср.}} = 24$ нм, ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 27$ нм, УФ $\lambda = 260$ нм	катализатор фоторазложения, антибактериальная активность: <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i>
<i>Sapindus mukurossi</i> (околоплодник, водный экстракт; флавоноиды, тритерпеноиды, углеводы, жирные кислоты, фенолы, жирные масла, сапонины), ZrOCl_2 [112, 113]	перемешивание (60 °C, 3–4 ч), старение геля (24 ч), центрифугирование, высушивание, отжиг (500–700 °C)	РФА 3–5 нм ПЭМ 5–10 нм УФ $\lambda = 275$ нм,	адсорбент метиленового синего
Водный экстракт мяты перечной (фенолы), ZrOCl_2 [114]	перемешивание (2 ч), высушивание (100 °C, 5 ч), отжиг (570 °C, 3 ч)	РФА $d_{\text{ср.}} = 6$ нм ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 7,5$ нм	адсорбент Co^{2+}
<i>Moringa oleifera</i> (листья, водный экстракт; алкалоиды, флавоноиды, антрахиноны, витамины, гликозиды и терпены), ZrOCl_2 [115]	перемешивание (60 °C, 3–4 ч), отстаивание сутки, центрифугирование, высушивание (60 °C), отжиг (700–800 °C)	РФА $d_{\text{ср.}} = 9$ нм УФ $\lambda = 293$ нм	антиоксидантная, антибактериальная активность: <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>S. aureus</i> , <i>B. subtilis</i> .
<i>Helianthus annuus</i> (семена; флавоноиды, дубильные вещества, терпены, алкалоиды, сапонины, стероиды, жирные масла), ZrOCl_2 [116]	перемешивание (2–3 ч), центрифугирование, высушивание (80 °C), отжиг (600 °C, 4 ч)	РФА 43–56 нм ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 35$ нм УФ $\lambda = 275$ нм	антибактериальная активность: <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>K. pneumoniae</i>

Продолжение таблицы

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
Клевер (листья, водный экстракт; изофлавоны, флавоноиды, птерокарпаны, кумарины), K_2ZrF_6 [117]	pH 10, 30 °C, высушивание (80 °C, 2 ч)	DLS 64 нм	противоопухолевая активность (клетки)
CuO, Cu ₂ O			
Кофейная шелуха, экстракция метанолом (кислоты, кофеин, липиды, сахара, углеводы), $CuSO_4$, NaOH [118]	pH 9, высушивание 105 °C	РФА Cu/Cu ₂ O $d_{cp.} = 16$ нм СЭМ $d_{cp.} = 16\text{--}147$ нм	противогрибковая активность: <i>P. capsici</i>
Кожура опунции (водный экстракт; клетчатка, фенолы, флавоноиды), $CuSO_4$ [119]	перемешивание (80 °C, 2 ч), центрифугирование, высушивание (50 °C), отжиг (500 °C, 2 ч)	РФА CuO $d_{cp.} = 40$ нм ПЭМ $d_{cp.} = 50$ нм УФ $\lambda = 292$ нм	катализатор
<i>Neem</i> (листья, водный экстракт; тритерпеноиды, фенолы, флавоноиды, каротиноиды, стероиды), $CuSO_4$, NaOH [120]	перемешивание (60 °C, 4 ч), высушивание (80 °C), отжиг (500 °C, 3 ч)	РФА CuO $d_{cp.} = 18$ нм УФ $\lambda = 420$ нм,	катализатор
<i>Parthenium hysterophorus</i> (водный экстракт; простые фенолы, фенольные кислоты, кумарины, дубильные вещества и флавоноиды), $CuSO_4$ [121, 122]	перемешивание до изменения окраски раствора, центрифугирование, высушивание (80 °C)	DLS $d_{cp.} = 20\text{--}120$ нм СЭМ $d_{cp.} = 60$ нм, РФА CuO $d_{cp.} = 32$ нм УФ $\lambda = 340$ нм	катализатор разложения рифампицина
<i>Eucalyptus Globoulus</i> (листья, водный экстракт; цитронеллаль, цинеол, камфен, фенхен, лимонен, фелландрен, пинен), $CuSO_4$ [123, 124]	старение геля (24 ч), центрифугирование, отжиг (400 °C)	DLS 82 нм РФА CuO $d_{cp.} = 86$ нм	адсорбент
<i>Morinda citrifolia</i> (листья, водный экстракт; фенолы, флавоноиды, каротиноиды, витамин С, танин, полиненасыщенные жирные кислоты, фитостерины, токоферолы), $CuSO_4$, NaOH [125]	перемешивание (pH 7, 70 °C, 5 ч), центрифугирование, высушивание (60 °C)	РФА CuO $d_{cp.} = 25\text{--}30$ нм ПЭМ $d_{cp.} = 30\text{--}50$ нм УФ $\lambda = 256$ нм	антибактериальная активность: <i>B. subtilis</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , противогрибковая активность: <i>A. flavus</i> , <i>A. niger</i> , <i>P. frequentans</i>

Продолжение таблицы

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
<i>Caesalpinia bonducella</i> (семена, водный экстракт; флавоноиды, танины, сапонины), Cu(NO ₃) ₂ [126, 127]	старение геля 7 ч до изменения окраски при комнатной температуре, центрифугирование, отжиг (450 °С, 1 ч)	РФА $d_{\text{ср.}} = 13$ нм CuO СЭМ микронные агломераты УФ $\lambda = 250$ нм	антибактериальная активность: <i>S. aureus</i> , <i>aeromonas</i>
<i>Sesbania grandiflora</i> (листья, водный экстракт; дубильные вещества, флавоноиды, кумароны, стероиды, тритерпены, алкалоиды), CuSO ₄ [128, 129]	перемешивание (60 °С), центрифугирование, старение геля (48 ч), отжиг (100 °С, 30 мин)	РФА CuO СЭМ 10–80 нм	противодиабетические свойства антиоксидантные, противовоспалительные свойства; антибактериальная активность: <i>E. coli</i> , <i>P. aeruginosa</i> , <i>S. aureus</i>
Fe ₃ O ₄ , γ-Fe ₂ O ₃			
<i>Cinnamomum tamala</i> (листья, водный экстракт; алкалоиды, терпены, флавоноиды, танины, полифенолы, сапонины), <i>Jatropha curcas</i> (листья, водный экстракт; дитерпеноиды, сесквитерпены, лигнаны, флавоноиды) FeCl ₂ , FeCl ₃ , NaOH [130–132]	центрифугирование, высушивание	DLS 154 нм РФА, СЭМ 30–42 нм	адсорбция; антибактериальная активность <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i>
Кабачок (кожура, водный экстракт; полифенольные соединения), гранат (кожура, водный экстракт; полифенолы, флавоноиды, дубильные вещества, антоцианы, органические кислоты), FeCl ₂ , FeCl ₃ , NaOH [133, 134]	перемешивание (80 °С, 30 мин), высушивание (90 °С, 24 ч)	РФА Fe ₃ O ₄ гранат $d_{\text{ср.}} = 8$ нм, кабачок $d_{\text{ср.}} = 12$ нм. ПЭМ гранат $d_{\text{ср.}} = 15$ нм, кабачок $d_{\text{ср.}} = 23$ нм	–
<i>Azadirachta indica</i> (листья, водный экстракт; тритерпеноиды, фенолы, флавоноиды, каротиноиды, стероиды), FeCl ₃ , FeSO ₄ , NH ₄ OH [135, 136]	pH 10–11, 80 °С, 1 ч, высушивание (60 °С 12 ч)	РФА Fe ₃ O ₄ $d_{\text{ср.}} = 8$ нм	адсорбция As(V) из воды.
<i>Kappaphycus alvarezii</i> , (водный экстракт; стероиды, дубильные вещества, флавоноиды, гликозиды, алкалоиды, фенольные соединения), NaOH, Fe ²⁺ , Fe ³⁺ [137, 138]	pH 11, перемешивание 1 ч, высушивание (70 °С 24 ч)	РФА Fe ₃ O ₄ $d_{\text{ср.}} = 17$ нм, ПЭМ $d_{\text{ср.}} = 15$ нм	–
<i>Azadirachta indica</i> (листья, водный экстракт; тритерпеноиды, фенолы, флавоноиды, каротиноиды, стероиды), FeCl ₃ , NaOH [139]	перемешивание (pH 11, 30 мин), центрифугирование, высушивание	РФА Fe ₃ O ₄ 70–90 нм	катализ

Окончание таблицы

Реагенты для получения экстракта и НЧ; соединения, входящие в экстракт	Условия синтеза	Характеристики НЧ	Применение
Гахару (листья, этанольный экстракт; флавоноиды, дубильные вещества, алкалоиды), FeCl ₃ , FeSO ₄ , NH ₄ OH [140, 141]	50 °C, pH 10	РФА Fe ₃ O ₄ , d _{ср.} = 33 нм	адсорбент
<i>Punica granatum fruit</i> (кожура, водный экстракт; фенолы) FeCl ₂ , FeCl ₃ , NaOH [142]	высушивание (pH 11, 70 °C)	ПЭМ d _{ср.} = 14 нм	магнитная гипертермия, МРТ
<i>Rhus coriaria</i> (водный экстракт; органические кислоты, флавоноиды, дубильные вещества), FeCl ₂ , FeCl ₃ , [143, 144]	перемешивание (80 °C), высушивание (200 °C), отжиг (500 °C, 1 ч)	DLS d _{ср.} = 9 нм РФА Fe ₃ O ₄ d _{ср.} = 27 нм ПЭМ d _{ср.} = 7 нм	–
Лимон (кожура, водный экстракт; фенольные соединения, каротиноиды, витамины, эфирные масла), FeCl ₂ , FeCl ₃ , NaOH [145]	перемешивание (pH 12; 2,5 ч), высушивание (60 °C)	РФА Fe ₃ O ₄ d _{ср.} = 1–3 нм ПЭМ d _{ср.} = 1–7 нм	антикоррозионное покрытие

в дальнейшем будут найдены и оптимизированы более экологичные варианты зеленого синтеза этого наноматериала.

4. Заключение

Методы зеленой химии активно применяют для получения НЧ оксидов металлов, в том числе при использовании в качестве реагентов растительных экстрактов. В последние годы было опубликовано много статей по этой теме. Однако это направление имеет большой потенциал для развития. Рассмотренные методы, как правило, являются более экологичными вариантами методов химического осаждения из растворов и золь-гель метода синтеза, которые могут сопровождаться последующей термической обработкой и химической модификацией получаемого продукта. Помимо таких преимуществ рассматриваемого метода, как простота, экономичность и возможность получения значительного количества конечного продукта, методы зеленого синтеза не оказывают значительного воздействия на окружающую среду, поскольку предполагают использование максимально возможного количества возобновляемых природных и нетоксичных реагентов. В случае оксида титана зеленая химия дает дополнительное преимущество – селективное формирование НЧ со структурой аната-

за, в то время как классические варианты золь-гель метода приводят к формированию нескольких полиморфных модификаций.

Следует отметить, что большое число ранее опубликованных результатов требуют уточнения, так как размерно-структурные характеристики полученных наноматериалов не были адекватно охарактеризованы: в ряде работ использованы 1–2 физико-химических метода, не позволяющих определить размер полученных частиц или адекватно сравнить его с результатами других работ. Для ряда наноразмерных оксидов, например оксидов железа, которые обладают важными для практического применения магнитными и суперпарамагнитными свойствами, до настоящего времени не решена задача поиска наиболее экологичных (не требующих использования токсичных осадителей) условий гелеобразования.

Кроме того, необходим подбор оптимальных условий получения экстрактов и гелеобразования при синтезе каждого оксида, а также их стандартизация. Различные значения температуры гелеобразования и отжига для одного набора из экстракта и соли металла приводят к формированию частиц разного размера. Разнообразие методик не позволяет связать состав компонентов экстракта с

размером конечного продукта. Выявление подобной связи позволило бы оптимизировать подбор наиболее эффективных и экономически выгодных

природных экстрактов растений, произрастающих в разных регионах, для синтеза наноматериалов с заданными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anastas, P.T.; Warner, J.C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford, N.Y., 1998. 148 с.
2. Soltys L., Olkhovyy O., Tatarchuk T., Naushad M. // *Magnetochemistry*. 2021. 7, 145 (10.3390/magnetochemistry7110145).
3. Zeng H., Du X.-W., Singh S. C., Kulinich S. A., Yang S., He J., Cai W. // *Advanced Functional Mater.* 2012. 22(7). 1333–1353 (10.1002/adfm.201102295).
4. Niculescu A.G., Chircov C., Grumezescu A.M. // *Methods*. 2022. 199. 16–27 (10.1016/j.ymeth.2021.04.018).
5. Shabatina T.I., Vernaya O.I., Shabatin V.P., Melnikov M.Y. // *Magnetochemistry*. 2020. 6(3). 30 (10.3390/magnetochemistry6030030).
6. Negrescu A.M., Killian M.S., Raghu S.N.V., Schmuiki P., Mazare A., Cimpan A. // *J. Funct. Biomater.* 2022. 13, 274 (10.3390/jfb13040274).
7. Верная О.И., Шумилкин А.С., Шабатин А.В., Шабатина Т.И., Мельников М. Я. // *Вест. Моск. ун-та. Сер. 2: Химия*. 2023. Т. 64. № 1. С. 3–10 (10.3103/S0027131422070112).
8. Верная О. И., Шумилкин А. С., Шабатин В. П., Шабатина Т. И., Мельников М. Я. // *Вест. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия*. 2020. Т. 61. № 5. С. 335–339 (10.3103/S0027131420050089).
9. Meierhofer, F., Fritsching, U. // *Energy & Fuels*. 2021. Т. 35. № 7. С. 5495–5537 (10.1021/acs.energyfuels.0c04054).
10. Tsuzuki T. // *Commun. Chem.* 2021. 4 (1). 143 (10.1038/s42004-021-00582-3).
11. Agarwal H., Kumar S. V., Rajeshkumar S. // *Resource-Efficient Technol.* 2017. 3 (4). 406–413 (10.1016/j.reffit.2017.03.002).
12. Zhou X.-Q., Hayat Z., Zhang D.-D., Li M.-Y., Hu S., Wu Q., Cao Y.-F., Yuan Y. // *Processes*. 2023. 11 (4). 1193. (10.3390/pr11041193).
13. Bekele E.T., Sintayehu Y.D., Murthy H.A., Shume M.S., Ayanie G.T., Turunesh D.J., Balachandran R., Tan K.B., Chan K.-Y., Ghotekar S., Ravikumar C.R. // *Chem. Papers*. 2022. 76 (9). 5967–5983 (doi.org/10.1007/s11696-022-02301-1).
14. Ahemed J., Pasha J., Kore R., Gade R., Bhongiri Y., Chetti P., Pola, S. // *J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry*. 2021. 419. 113455 (10.1016/j.jphotochem.2021.113455).
15. Sanakousar F.M., Vidyasagar C.C., Jiménez-Pérez V.M., Prakash K. // *Mater. Sci. in semiconductor processing*. 2022. 140. 106390 (10.1016/j.mssp.2021.106390).
16. Khan S.H., Pathak B. // *Env. Nanotechnol. Monitoring Manag.* 2020. 13. 100290 (<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100290>).
17. Dhiman V., Kondal N. // *Colloid Interface Sci. Comm.* 2021. 41. 100380 (10.1007/s13201-022-01827-9).
18. Xiao L., Wang S., Yang, D., Zou Z., Li J. // *J. Wuhan Univ. Technol.* 2019. 34. 243–253 (10.1007/s11595-019-2042-x).
19. Dimkpa C.O., Andrews J., Fugice J., Singh U., Bindran P.S., Elmer W.H., Gardea-Torresdey J.L., White J.C. // *Front. Plant Sci.* 2020. 11. 168 (10.3389/fpls.2020.00168).
20. Raliya R., Nair R., Chavalmane S., Wang W.-N., Biswas P. // *Metallomics*. 2015. 7. 1584–1594 (10.1039/c5mt00168d).
21. Zafar A.; Khosa M.K., Noor A., Qayyum, S., Saif M.J. // *Polymers*. 2022. 14. 5201 (10.3390/polym14235201).
22. Irede E.L., Awoyemi R.F., Owolabi B., Aworinde O.R., Kajola R.O., Hazeed A., Rajig A.A., Ganiyuh L.O., Onukwulii C.O., Onivefu A.P., Ifijen I.H. // *RSC advances*. 2024. 14 (29). 20992–21034 (doi: 10.1039/D4RA02452D).
23. Khairnar B.A., Dabhane H.A., Dashpute R.S., Girase M.S., Nalawade P.M., Gaikwad V.B. // *Inorganic Chem. Comm.* 2022. 146. 110155 (10.1016/j.inoche.2022.110155).
24. Islam F., Shohag S., Uddin M.J., Islam M.R., Nafady M.H., Akter A., Mitra S., Roy A., Emran T.B. // *Materials* 2022. 15. 2160 (10.3390/ma15062160).
25. Shabatina T.I., Vernaya O.I., Melnikov M.Y. // *Molecules*. 2023. 28 (4). 1603 (10.3390/molecules28041603).
26. Shabatina T., Vernaya O., Shumilkin A., Semenov A., Melnikov M. // *Materials*. 2022. 15(10). 3602 (10.3390/ma15103602).
27. El-Saadony M.T., Fang G., Yan S., Alkafaas S.S., El Nasharty M.A., Khedr S.A., Ghosh S., Dladla M., Elkafas S.S., Ibrahim E.H., Salem H.M., Mosa W. F.A., Ahmed A.E., Mohammed D.M., Korma S.A., El-Tarabily M.K., Saad A.M., El-Tarabily K.A., AbuQamar S.F. // *Int. J. Nanomed.* 2024. 12889–12937 (10.2147/IJN.S487188).
28. Rodrigues J., Pereira S.O., Zannoni J. Rodrigues C., Brás M., Costa F.M., Monteiro T. // *Chemosensors*. 2022. 10. 39 (10.3390/chemosensors10020039).
29. Vyas S. // *Johnson Matthey Technol. Rev.* 2020. 64 (2). 202–218 (10.1595/205651320X15694993568524).
30. Kumari P., Misra K.P., Chattopadhyay S., Samanta S. // *Mater. Today: Proceedings*. 2021. 43. 3297–3302 (10.1016/j.matpr.2021.02.299).
31. Liu C., Xiao C., Li W. // *J. Material. Chem. C*. 2021. 9 (40). 14093–14114 (10.1039/D1TC03434K).

32. Mehrkhah R., Mohammadi M., Zenhari A., Baghayeri M., Roknabadi M.R. // *Industrial Eng. Chem. Res.* 2022. 62 (11). 4573–4586 (10.1021/acs.iecr.2c02528).
33. Ali I. Imanova G.T., Mbianda X.Y., Alharbi O.M. // *Sustainable Energy Technol. Assessments.* 2022. 51. 101926 (10.1016/j.seta.2021.101926).
34. Ismael M. // *Solar Energy.* 2020. 211. 522–546 (10.1016/j.solener.2020.09.073).
35. Ziental D., Czarzynska-Goslinska B., Mlynarczyk D.T., Glowacka-Sobotta A., Stanisz B., Goslinski T., Sobotta L. // *Nanomaterials.* 2020. 10. 387 (10.3390/nano10020387).
36. Zand A.D., Mikaeili Tabrizi A., Vaezi Heir A. // *Bio-remediation J.* 2020. 24 (2–3). 171–189 (10.1080/10889868.2020.1799929).
37. Bhattacharjya S., Adhikari T., Sahu A., Patra A.K. // *Ecotoxicology.* 2021. 30. 719–732 (10.1007/s10646-021-02398-2).
38. Zahra Z., Habib Z., Chung S., Badshah M.A. // *Nanomaterials.* 2020. 10. 1469 (10.3390/nano10081469).
39. Kwon M., Kim J., Kim J. // *Polymers.* 2021. 13. 1331 (10.3390/polym13081331).
40. Xie X., Hao C., Huang Y., Huang Z. // *Sci. Total Env.* 2020. 724. 138059 (10.1016/j.scitotenv.2020.138059).
41. Pushpamalini T., Keerthana M., Sangavi R., Nagaraj A., Kamaraj P. // *Mater. Tod.: Proceedings.* 2021. 40, S180–S184 (10.1016/j.matpr.2020.08.438).
42. Mutuma B.K., Shao G.N., Kim W.D., Kim H.T. // *J. colloid interface sci.* 2015. 442. 1–7 (10.1016/j.jcis.2014.11.060).
43. Kumar R., Chauhan V., Gupta D., Upadhyay S., Ram J., Kumar S. // *Indian J. Pure Appl. Phys (IJPAP).* 2021. 59 (12). 811–826.
44. Ilyas M., Ullah S., Khan S., Ahmad A., Rahman F., Khan S. // *Plant.* 2022. 10 (2). 59–68 (10.11648/j.plant.20221002.15).
45. Bannunah A.M. // *Molecules.* 2023. 28. 5428 (10.3390/molecules28145428).
46. Shailaja N.R., Arulmozhi M., Balraj B., Siva C. // *J. Indian Chem. Soc.* 2023. 100. 100991.
47. Fu C., Sun J., Du Y., Zhou M. // *ChemCatChem.* 2024. e202301545 (10.1002/cctc.202301545).
48. Naz S., Gul A., Zia M., Javed R. // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2023. 107 (4). 1039–1061 (10.1007/s00253-023-12364-z).
49. Alizadeh S.R., Ebrahimzadeh M.A. // *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents).* 2021. 21 (12). 1529–1543 (10.2174/1871520620666201029111532).
50. Baeza A., Guillena G., Ramón D.J. // *ChemCatChem.* 2015. 8 (1). 49–67 (10.1002/cctc.201500854).
51. Верная О.И., Кротова И.Н., Максимов Ю.В., Ростовщикова Т.Н. // *Нефтехимия.* 2017. Т. 56. № 1. С. 96–102 (10.1134/S0965544116080181).
52. Shabatina T.I., Vernaya O.I., Shimanovskiy N.L., Melnikov M.Y. // *Pharmaceutics.* 2023. 15. 1181 (10.3390/pharmaceutics15041181).
53. Baye H., Leshe S. // *African J. Chem. Educ.* 2019. 9 (2). 20–40.
54. Shaghaghi Z., Mollaei S., Amani-Ghadim A. R., Abedini Z. // *Mater. Chem. Phys.* 2023. 305. 127900 (10.1016/j.matchemphys.2023.127900).
55. Li H., Zou Y., Liang J., Zhao Z., Zhou N., Gao Y., Yan R., Zhou Q., Li C. // *Forests* 2023. 14. 2002 (10.3390/f14102002).
56. Sadiq H., Sher F., Sehar S., Lima E.C., Zhang S., Iqbal H.M., Zafar F., Nuhanović M. // *J. Mol. Liq.* 2021. 335. 116567 (0.1016/j.molliq.2021.116567).
57. da Rosa A.C.S., Hoscheid J., Garcia V.A.d.S., de Oliveira Santos Junior O., da Silva C. // *Processes* 2024. 12. 2270 (10.3390/pr12102270).
58. Thi T.U.D., Nguyen T.T., Thi Y.D., Thi K. H.T., Phan B.T., Pham K.N. // *RSC advances.* 2020. 10 (40). 23899–23907 (doi: 10.1039/d0ra04926c).
59. Mojo T., Sutrisno S., Marfuah S. // *E3S Web of Conferences* 2024. 481. 06002. EDP Sciences (10.1051/e3sconf/202448106002).
60. Menazea A.A., Ismail A.M., Samy A. // *J. Inorgan. Organomet. Polym. Mater.* 2021. 31 (11). 4250–4259 (10.1007/s10904-021-02074-2).
61. Jayachandran A., Aswathy T.R., Nair A.S. // *Biochem. Biophys. Rep.* 2021. 26. 100995 (10.1016/j.bbrep.2021.100995).
62. Aswathy T.R., Gayathri E., Praveen J., Nair A.S., Sugunan V.S. // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry.* 2019. 8 (2). 1637–1642.
63. Vasantharaj S., Sathiyavimal S., Senthilkumar P., Kalpana V.N., Rajalakshmi G., Alsehli, M., Elfasakhany A. Pugazhendhi A. // *J. Env. Chem. Eng.* 2021. 9 (4). 105772 (10.1016/j.jece.2021.105772).
64. Anggia V. // *Arabian Journal of Medicinal and Aromatic Plants* 2023. 9(3). 74–90 (10.48347/IMIST.PRSM/ajmap-v9i3.49166).
65. Aldeen T.S., Mohamed H.E.A., Maaza M. // *J. Phys. Chem. Sol.* 2022. 160. 110313 (10.1016/j.jpcs.2021.110313).
66. Singab A.N., El-Taher E.M. M., Elgindi M.R., Kassem M.E.S. // *Asian Pacific Journal of Tropical Disease* 2015. 5 (7). 552–558 (10.1016/S2222-1808(15)60835-0).
67. Ramesh P., Saravanan K., Manogar P., Johnson J., Vinoth E., Mayakannan M. // *Sensing Bio-Sensing Res.* 2021. 31. 100399 (10.1016/j.sbsr.2021.100399).
68. Soundharajan S.R., Ponnusamy R.D. // *Int. J. Pharm. Pharm. Sci.* 2014. 6 (7). 327–330.
69. Manojkumar U., Kaliannan D., Srinivasan V., Balasubramanian B., Kamyab H., Mussa Z.H., Palaniyappan J., Mesbah M., Chelliapan S., Palaninaicker S. // *Chemosphere.* 2023. 323. 138263 (10.1016/j.chemosphere.2023.138263).
70. Bouras Y., Atef C., Cherrada N., Gheraissa N., Chenna D., Chems A.E., Hemmami H., Atoki A.V., Sawicka B., Atanassova M., Ahmad S.F., Attia S.M.,

- Messaoudi M. // *Italian Journal of Food Science* 2024. 36 (4). 193–207 (10.15586/ijfs.v36i4.2691).
71. Saini A., Kumar S., Kaur H., Gaur J., Singh G., Kaur M., Kumar S., Limbu R., Pal S.R. Kaur N. // *Interactions*. 2024. 245. 174 (10.1007/s10751-024-02012-x).
72. Narath S., Koroth S.K., Shankar S.S., George B., Mutta V., Waclawek S., Černík M., Padil V.V.T., Varma R.S. // *Nanomaterials (Basel)*. 2021. 11 (6). 1558 (10.3390/nano11061558).
73. Umavathi S., Mahboob S., Govindarajan M., Al-Ghanim K. A., Ahmed Z., Virik P., Al-Mulhm N., Subash M., Gopinath K., Kavitha C. // *Saudi J. Biol. Sci.* 2021. 28 (3). 1808–1815 (10.1016/j.sjbs.2020.12.025).
74. Gul Rauf A., Khan I.A., Alnasser S.M., Shah S.U.A., Rahman M.M. // *Evid. Based Complement. Alternat. Med.* 2022. 2022:6088585 (10.1155/2022/6088585).
75. Umamaheswari A., Prabu S.L., John S.A., Puratchikody A. // *Biotechnol. Rep.* 2021. 29. e00595 (10.1016/j.btre.2021.e00595).
76. Hayat K., Din I.U., Alam K., Khan F.U., Khan M., Mohamed H.I. // *Biomass Conv. Bioref.* 2024 (10.1007/s13399-024-05804-x).
77. Al-Snafi A.E. // *IOSR journal of pharmacy* 2020. 10(1). 17–25.
78. Senhaji S., Lamchouri F., Boulfia M., Lachkar N., Bouabid K., Toufik H. // *South African Journal of Botany* 2022. 147. 697–712 (10.1016/j.sajb.2022.03.005).
79. Faisal S., Jan H., Shah S. A., Shah S., Khan A., Akbar M.T., Rizwan M., Jan F., Wajidullah A., Akhtar N., Khattak A., Syed S. // *ACS omega*. 2021. 6 (14). 9709–9722 (10.1021/acsomega.1c00310).
80. Weerakoon W.M.T.D.N., Perera P.R.T., Rajapaksha M.H., Liyanage A. // *International Journal of Innovation Scientific Research and Review*. 2021. 3 (6). 1316–1320.
81. Selim Y.A., Azb M.A., Ragab I., Abd H.M., El-Azim M. // *Scientific reports*. 2020. 10 (1). 3445 (10.1038/s41598-020-60541-1).
82. El-Amier Y.A., Abduljabbar B.T., El-Zayat, M.M., Sarker T. C., Abd-ElGawad A. M. // *Sci Rep* 2024. 23522 (10.1038/s41598-024-74471-9).
83. Abel S., Tesfaye J.L., Shanmugam R., Dwarampudi L.P., Lamessa G., Nagaprasad N., Benti M., Krishnaraj R. // *J. Nanomat.* 2021. 2021 (1). 3413350 (10.1155/2021/3413350).
84. de Almeida R.F., Trevisan M.T.S., Thomaziello R.A., Breuer A., Klika K.D., Ulrich C.M., Owen R.W. // *Food Research International* 2019. 115. 493–503 (10.1016/j.foodres.2018.10.006).
85. Manimegalai P., Selvam K., Loganathan S., Kirubakaran D., Shivakumar M.S., Govindasamy M., Rajaji U, Bahajaj A.A. // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. 14 (11). 12559–12574 (10.1007/s13399-023-04279-6).
86. Shingade S.P., Kakde R.B. // *Pharmacognosy Reviews* 2021. 15 (29). 65 (10.5530/phrev.2021.15.7).
87. Abomuti M.A., Danish E.Y., Firoz A., Hasan N., Malik M.A. // *Biology*. 2021. 10. 1075 (doi.org/10.3390/biology10111075).
88. Brezoiu A.-M., Prundeanu M., Berger D., Deaconu M., Matei C., Oprea O., Vasile E., Negreanu-Pîrjol T., Muntean D., Danciu C. // *Nanomaterials* 2020. 10. 820 (10.3390/nano10050820).
89. Álvarez-Chimal R., García-Pérez V.I., Álvarez-Pérez M.A., Arenas-Alatorre J.Á. // *Mater. Sci. Eng.: C*. 2021. 118. 111540 (10.1016/j.msec.2020.111540).
90. Kamdem B. P., Le Doux Kamto E., Paumo H.K., Katata-Seru L.M., Pegnyemb D.E., Igne F.E. // *The Natural Products Journal*. 2022. 12(3). 31–73 (10.2174/2210315511666210920144526).
91. Velsankar K., Venkatesan A., Muthumari P., Suganya S., Mohandoss S., Sudhakar S. // *J. Mol. Struct.* 2022. 1255. 132420 (10.1016/j.molstruc.2022.132420).
92. Nagaraj Santhiya N.S., Suriyamoorthy Priyanga S.P., Subrhamanian Hemmalakshmi S.H., Kanakasabapathi Devaki K.D. // *Journal of Applied Pharmaceutical Science*. 2016. 6 (7). 147–155 (10.7324/JAPS.2016.60722).
93. Abdelbaky A.S., Abd El-Mageed T.A., Babalghith A.O., Selim S., Mohamed A.M.H.A. // *Antioxidants*. 2022. 11. 1444 (10.3390/antiox11081444).
94. Ansari A., Siddiqui V.U., Rehman W.U., Akram M.K., Siddiqui W.A., Alosaimi A.M., Hussein M.A., Rafatullah M. // *Catalysts*. 2022. 12. 181 (10.3390/catal12020181).
95. Elshikh M.S., Rani E., AlFarraj D.A., Al-Hemaid F.M., Gawwad M.R.A., Malar T.J., Dyona R., Vijayaraghavan P. // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2022. 117. 101743 (10.1016/j.pmpp.2021.101743).
96. Saini R., Kumar P. // *Inorganic Chemistry Communications*. 2023. 156. 111221 (10.1016/j.inoche.2023.111221).
97. Sharma P., Dwivedee B.P., Bisht D., Dash A.K., Kumar D. // *Heliyon*. 2019. 5 (9). e02437 (10.1016/j.heliyon.2019.e02437).
98. Pavithra S., Bessy T.C., Bindhu M.R., Venkatesan R., Parimaladevi R., Alam M.M., Mayandi J., Umadevi M. // *J. Alloys Comp.* 2023. 960. 170638 (10.1016/j.jallcom.2023.170638).
99. Khasanah N., Martono E., Trisyono Y.A., Wijonarko A. // *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2021. 16 (6). 677–682 (10.18280/ij dne.160609).
100. Nabi G., Ain Q.-U., Tahir M.B., Riaz N.K., Iqbal T., Rafique M., Rizwan M. // *Int. J. of Env. Anal. Chem.* 2022. 102 (2). 434–442 (10.1080/03067319.2020.1722816).
101. Magalhães D., Vilas-Boas A.A., Teixeira P., Pintado M. // *Foods*. 2023. 12 (5). 1095 (10.3390/foods12051095).
102. Rajendhiran R., Deivasigamani V., Palanisamy J., Masan S., Pitchaiya S. // *Mater. Tod.: Proceedings*. 2021. 45. 2232–2238 (10.1016/j.matpr.2020.10.223).

103. Helmy E.T., Abouellef E.M., Soliman U.A., Pan J.H. // *Chemosphere*. 2021. 271. 129524 (10.1016/j.chemosphere.2020.129524).
104. Anwar M.A., El Gedaily R.A., Salama A., Aboulthana W.M., Kandil Z.A., Abdel-Dayem S.I.A. // *J Ethnopharmacol*. 2025. 337 (Pt3), 118983 (10.1016/j.jep.2024.118983).
105. Irshad M.A., Rehman M.Z., Anwar-ul-Haq M., Rizwan M., Nawaz R., Shakoor M. B., Wijaya L., Alyemeni M.N., Parvaiz Ahmad P., Ali S. // *J. Hazardous Mater*. 2021. 415. 125585 (10.1016/j.jhazmat.2021.125585).
106. Das U., Saha T., Das S.K. // *Indian J. Clin. Biochem*. 2022. 37 (2). 192–198 (10.1007/s12291-021-00964-3).
107. Nabi G., Majid A., Riaz A., Alharbi T., Kamran A.M., Al-Habardi M. // *Inorganic Chemistry Communications*. 2021. 129. 108618 (10.1016/j.inoche.2021.108618).
108. Muthuvel A., Said N.M., Jothibas M., Gurushankar K., Mohana V. // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2021. 32. 23522–23539 (10.1007/s10854-021-06840-3).
109. Rao B., Rajeswari D., Devarakonda R., Battu H. // *World J. Pharm. Pharm. Sci*. 2018. 7 (4). 562–585 (10.20959/wjpps20184-11336).
110. Chelliah P., Wabaidur S.M., Sharma H.P., Majdi H.S., Smaït D.A., Najm M.A., Iqbal A., Lai W.-C. // *Separations*. 2023. 10. 156 (10.3390/separations10030156).
111. Jain M., Gilhotra R., Singh R.P., Mittal J. // *MOJ Biol Med* 2017. 2(3). 236–256 (10.15406/mojbm.2017.02.00050).
112. Alagarsamy A., Chandrasekaran S., Manikandan A. // *J. Mol. Struc*. 2022. 1247. 131275 (10.1016/j.molstruc.2021.131275).
113. Akhtar N.A.H.I.D., Wani A.K., Mir T.U.G., Kumar N.A.V.N.E.E.T., Mannan, M.A.U. // *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol*. 2021. 22. 300–319.
114. Hasan I.M.A., Salah El-Din H., AbdElRaady A.A. // *Inorganics*. 2022. 10. 257 (10.3390/inorganics10120257).
115. Annu A., Sivasankari C., Krupasankar U. // *Mater. Tod.: Proceedings*. 2020. 33. 5317–5323 (10.1016/j.matpr.2020.02.975).
116. Goyal P., Bhardwaj A., MehtavB.K., Mehta D. // *J. Indian Chem. Soc*. 2021. 98 (8). 100089 (10.1016/j.jics.2021.100089).
117. Ameri Shah Reza M., Rasouli A., Komeili Movahhed T., Astaraki L. // *Archives Hygiene Sci*. 2024. 13 (1). 16–22 (10.34172/AHS.13.1.300.2).
118. Le D.T., Tran T.P., Le T.N.A., Tran Q.N., Nguyen H.Q., Bui D.D. // *Green Chem. Lett. Rev*. 2024. 17 (1). 2432491 (10.1080/17518253.2024.2432491).
119. Badri A., Slimi S., Guergueb M., Kahri H., Mateos X. // *Inorganic Chem. Comm*. 2021. 134. 109027 (10.1016/j.inoche.2021.109027).
120. Yadeta Gemachu L., Lealem Birhanu A. // *Green Chem. Lett. Rev*. 2023. 17 (1). 2293841 (10.1080/17518253.2023.2293841).
121. Nzilu D.M., Madivoli E.S., Makhanu D.S., Wanaikai S.I., Kiprono G.K., Kareru P.G. // *Sci. Rep*. 2023. 13. 14030 (10.1038/s41598-023-41119-z).
122. Panwar R., Kumar Sharma A., Dutt, D., Pruthi V. // *Advances in Bioscience and Biotechnology* 2015. 6. 11–17 (10.4236/abb.2015.61002).
123. Alhalili Z. // *Arabian J. Chem*. 2022. 15 (5). 103739 (10.1016/j.arabjc.2022.103739).
124. Clarke S. *Composition of essential oils and other materials. Essential Chemistry for Aromatherapy (Second Edition)*. Edinburgh: Churchill Livingstone. 2008. 123–229.
125. Priya M., Venkatesan R., Deepa S., Sana S.S., Arumugam S., Karami A.M., Vetcher A.A., Kim S.C. // *Sci. Rep*. 2023. 13. 18838 (10.1038/s41598-023-46002-5).
126. Sukumar S., Rudrasenan A., Padmanabhan Nambiar D. // *ACS Omega*. 2020. 5 (2). 1040–1051 (10.1021/acsomega.9b02857).
127. Widhiantara I.G., Arunngam P., Siswanto F.M. // *Biomedical and Pharmacology Journal*. 2018. 11 (2). 1127–1133 (10.13005/bpj/1473).
128. Ramasubbu K., Padmanabhan S., Al-Ghanim K.A., Nicoletti M., Govindarajan M., Sachivkina N., Rajeswari V.D. // *Fermentation*. 2023. 9. 332 (10.3390/fermentation9040332).
129. Dange S., Jadhav R., Vikhe S. // *Asian Journal of Pharmacy and Technology*. 2022. 12 (1). 20–24 (10.52711/2231-5713.2022.00004).
130. Das C., Sen S., Singh T., Ghosh T., Paul S.S., Kim T.W., Jeon S., Maiti D.K., Im J., Biswas G. // *Nanomaterials*. 2020. 10. 1615 (10.3390/nano10081615).
131. Narath S., Koroth S.K., Shankar S.S., George B., Mutta V., Wacławek S., Černík M., Padil V.V.T., Varma R.S. // *Nanomaterials (Basel)*. 2021. 11(6). 1558 (10.3390/nano11061558).
132. Wang Y., Zhou D., Bai X., Meng Q., Xie H., Wu G., Chen G., Hou Y., Li N. // *Chinese Herbal Medicines*. 2023. 15 (3). 463–469 (10.1016/j.chmed.2022.08.010).
133. Etemadifar R., Kianvash A., Arsalani N., Abouzari-Lotf E., Hajalilou A. // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2018. 29. 17144–17153 (10.1007/s10854-018-9805-6).
134. Siddiqui S.A., Singh S., Nayik G.A. // *Journal of Functional Foods*. 2024. 116. 106132 (10.1016/j.jff.2024.106132).
135. Parajuli K., Sah A. K., Paudyal H. // *Green Sustainable Chem*. 2020. 10 (4). 117–132 (10.4236/gsc.2020.104009).
136. Hemdan B.A., Mostafa A., Elbatanony M.M., El-Feky A.M., Paunova-Krasteva T., Stoitsova S., El-Liethy M.A., El-Taweel G.E., Abu Mraheil M. // *Plos one*. 2023. 18 (3). e0282729 (10.1371/journal.pone.0282729).
137. Yew Y.P., Shameli K., Miyake M., Kuwano N., Bt Ahmad Khairudin N.B., Bt Mohamad S.E., Lee K.X. // *Nanoscale Res. Lett*. 2016. 11. 276 (10.1186/s11671-016-1498-2).
138. Das D., Arulkumar A., Paramasivam S., Lopez-

- Santamarina A., Del Carmen Mondragon A., Miranda Lopez J.M. // *Foods*. 2023. 12(14). 2811 (10.3390/foods12142811).
139. Akhtar M. S., Fiaz S., Aslam S., Chung S., Ditta A., Irshad M. A., Al-Mohaimed A.M., Iqbal R., Al-onazi W.A., Rizwan M., Nakashima Y. // *Sci. Rep.* 2024. 14. 18172 (10.1038/s41598-024-69184-y).
140. Sulistyaningsih T., Sari D.A., Widiarti N., Astuti W., Wulandari R., Harjunowibowo D. // *Waste Management Bulletin*. 2024. 2 (1) 327–339 (10.1016/j.wmb.2024.02.007).
141. Sulistyaningsih T., Sari D.A., Widiarti N., Astuti W., Wulandari R., Harjunowibowo D. // *Waste Management Bulletin*. 2024. 2 (1). 327–339 (10.1016/j.wmb.2024.02.007).
142. Yusefi M., Shameli K., Hedayatnasab Z., Teow S.Y., Ismail U.N., Azlan C.A., Rasit Ali R. // *Res. Chem. Intermed.* 2021. 47. 1789–1808 (10.1007/s11164-020-04388-1).
143. Piro N.S., Hamad S.M., Mohammed A.S., Barzinjy A.A. // *IEEE Transactions on NanoBioscience*. 2023. 22 (2). 308–317 (10.1109/TNB.2022.3187344).
144. Arena K., Trovato E., Cacciola F., Spagnuolo L., Pannucci E., Guarnaccia P., Santi L., Dugo P., Mondello L., Dugo L. // *Molecules*. 2022 27(5). 1727 (10.3390/molecules27051727).
145. Elizondo-Villarreal N., Verástegui-Domínguez L., Rodríguez-Batista R., Gándara-Martínez E., Alcortagarcía A., Martínez-Delgado D., Rodríguez-Castellanos E.A., Vázquez-Rodríguez F., Gómez-Rodríguez C. // *Materials*. 2022. 15. 8328 (10.3390/ma15238328).

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);

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);

Яна Андреевна Громова – науч. сотр. кафедры химической кинетики химического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, канд. хим. наук (chemyaninka@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 10.04.2025;
одобрена после рецензирования 16.04.2025;
принята к публикации 15.05.2025.