

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 546.57+[546.62:54-31]:54.052+615.28

СИНТЕЗ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИЦИЙ  
ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И СЕРЕБРА

© 2025 г. А. А. Остроушко<sup>a,\*</sup>, А. Е. Пермякова<sup>a</sup>, Т. Ю. Жуланова<sup>a,b</sup>, А. А. Ермошин<sup>a</sup>,  
А. А. Меленцова<sup>c</sup>, Р. Р. Мансуров<sup>a</sup>, Д. К. Кузнецов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002 Россия

<sup>b</sup>Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, ул. Академическая, 20, Екатеринбург, 620066 Россия

<sup>c</sup>Институт химии твердого тела УрО РАН, ул. Первомайская, 91, Екатеринбург, 620108 Россия

\*e-mail: alexander.ostroushko@urfu.ru

Поступила в редакцию 27.06.2024 г.

После доработки 17.09.2024 г.

Принята к публикации 27.09.2024 г.

Установлена возможность получения дисперсных нанокомпозиций на основе оксида алюминия и металлического серебра. Композиции могут быть получены в одном реакционном цикле с использованием прекурсоров в виде водных растворов, содержащих нитраты алюминия и серебра, а также органический компонент: поливиниловый спирт, поливинилпирролидон, глицин, глицерин. Электронно-микроскопические и рентгеновские исследования показали, что наночастицы серебра распределены на поверхности агрегатов оксида алюминия, содержащих фазы гидратированного оксида алюминия,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , низкотемпературных модификаций оксида алюминия. Полученные образцы композиций обладают приемлемыми для практического применения антибактериальными свойствами. Наилучшие характеристики в этом плане при проведении экспериментов на культурах кишечной палочки (*Escherichia coli*) имеют образцы, полученные из прекурсоров с поливиниловым спиртом и поливинилпирролидоном, подвергнутые окончательной термообработке при температуре 850°C в течение 8 ч.

**Ключевые слова:** оксид алюминия, серебро, нанокомпозиции, синтез в реакциях горения, бактерицидные свойства

DOI: 10.31857/S0044457X25010023, EDN: IBCVWW

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание в мире уделяется исследованию наноразмерных частиц серебра [1–5], обладающих высокими бактерицидными свойствами, а также разработке методов получения наночастиц [5–9]. Такие наночастицы могут быть использованы в качестве наружного и местного обеззараживающего средства, в том числе в составе различных композиций с органическими и неорганическими материалами, а также вводиться во внутренние среды организма. Существенное влияние на целевые антибактериальные свойства наночастиц серебра и их взаимодействие с живыми средами оказывают такие факторы, как их размер и морфология, подобная корреляция также активно исследуется в данное время [2]. Варьирование физических и химических методов и условий получения наночастиц приводит к большим различиям формы таких частиц. Биомедицинское использование наночастиц серебра не исчерпывается вышеуказанным, они могут применяться

и в области спектроскопических исследований биологических объектов [7, 10].

Одним из достаточно простых в реализации и управляемых методов получения оксидных наноструктурированных материалов [11, 12] различного состава и структурного типа, в том числе содержащих наночастицы металлического серебра [13], является синтез в реакциях горения нитрат-органических прекурсоров [14–22] (Solution Combustion Synthesis – SCS). Поэтому в настоящей работе изучена возможность получения наноразмерных частиц серебра указанным методом. При этом с целью предотвращения самоагрегации наночастиц серебра было принято решение использовать носитель. В качестве носителя были выбраны керамические частицы, поскольку они по многим показателям не уступают другим носителям фармацевтических препаратов (металлы, природные и синтетические полимеры) и имеют ряд преимуществ [23]. Так, твердые частицы могут легко перемещаться в различных системах организма, таких как кровеносные сосуды, пищеварительный тракт, проходить

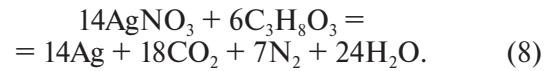
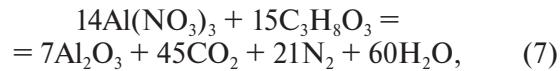
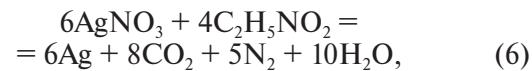
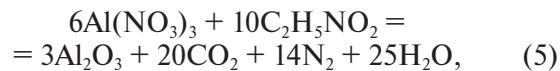
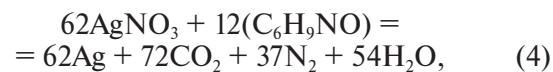
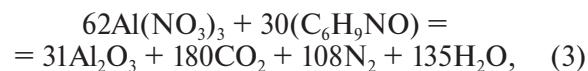
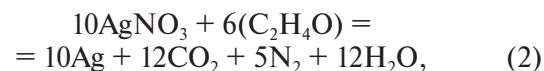
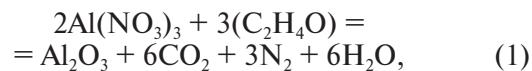
сквозь клеточные мембранны и т.д., доставляя лекарственные препараты не хуже их полимерных аналогов [24]. Керамические частицы обладают большим соотношением площади поверхности к объему, что обеспечивает высокую загрузку препаратом, его постепенное высвобождение и пролонгированное действие [25]. К уникальным свойствам таких носителей относятся устойчивость к биодеградации, стабильность в организме человека при изменении pH и температуры, биосовместимость [23]. Кроме того, процесс производства керамических частиц является более легким, недорогим и быстрым. Достижения в области нанотехнологий позволяют производить керамические частицы высокой чистоты, с большим соотношением площади поверхности к объему, а также контролировать размер, форму и пористость частиц [26]. Наноструктурированный оксид алюминия удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям. Он обладает такими свойствами, как химическая инертность в среде организма, устойчивость к окислению и коррозии, механическая прочность, стабильность, низкая токсичность и биосовместимость, что позволяет рассматривать его в качестве перспективного носителя для лекарственных препаратов, в том числе антибактериальных [26]. Существует множество методов получения наноструктурированного оксида алюминия [27–29]. Кроме того, имеется возможность получения композита, включающего наночастицы серебра и оксид алюминия в одном цикле при использовании метода синтеза в реакциях горения, что существенно упрощает технологию и экономит время. Также нанокомпозиции оксид алюминия–серебро рассматриваются в качестве наполнителей для волокон антибактериальной ткани и в качестве антибактериальных препаратов. Следовательно, получение такой гибридной системы простым и доступным способом позволит расширить возможности биомедицинского использования композитов, включающих наночастицы серебра. Синтез оксида алюминия в дисперсном состоянии в реакциях горения изучен нами ранее [30]. Полученные порошки содержали фазы частично гидратированного оксида алюминия состава  $\text{Al}_{10}\text{O}_{15} \cdot \text{H}_2\text{O}$  и  $(\text{Al}_2\text{O}_3)_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (акдалит) [30] и были использованы в качестве наноразмерной добавки для снижения температуры спекания технической керамики на основе оксида алюминия. Следует отметить, что оксид алюминия относится к биосовместимым материалам, применяемым, например, в стоматологии и других областях медицины. Имеющиеся данные по цитотоксичности агрегатов частиц оксида алюминия, в частности по отношению

к опухолевым клеткам, касаются главным образом систем, где присутствуют его тонкие нанолисты [31, 32].

Цель настоящей работы – изучение возможности и особенностей синтеза нанокомпозиций оксид алюминия–серебро в одном реакционном цикле, а также исследование влияния состава исходных нитрат-органических прекурсоров на морфологию и бактерицидные свойства получаемых серебросодержащих нанокомпозиций.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза нанокомпозиций оксид алюминия–серебро в качестве прекурсоров использовали исходные водные растворы, содержащие нитрат алюминия  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , нитрат серебра  $\text{AgNO}_3$  (оба квалификации “ч. д. а.”), поливиниловый спирт (ПВС, среднемолекулярный 11/2 ГОСТ 10779-78, вязкость 4%-ного водного раствора при комнатной температуре 11 сПз (0.011 Па · с), количество остаточных ацетатных групп 2%, молекулярная масса 44000), поливинилпирролидон (ПВП, молекулярная масса 40000, Sigma-Aldrich, PVP40, CAS 9003-39-8), глицерин марки “х. ч.” и глицерин квалификации “ч. д. а.”. Прекурсор был рассчитан на получение композиции, содержащей 90 мас. % оксида алюминия и 10 мас. % металлического серебра. Стехиометрическое соотношение органического компонента и нитратов было рассчитано исходя из реакций горения (1)–(8) с образованием в качестве газообразных продуктов азота, диоксида углерода, паров воды:



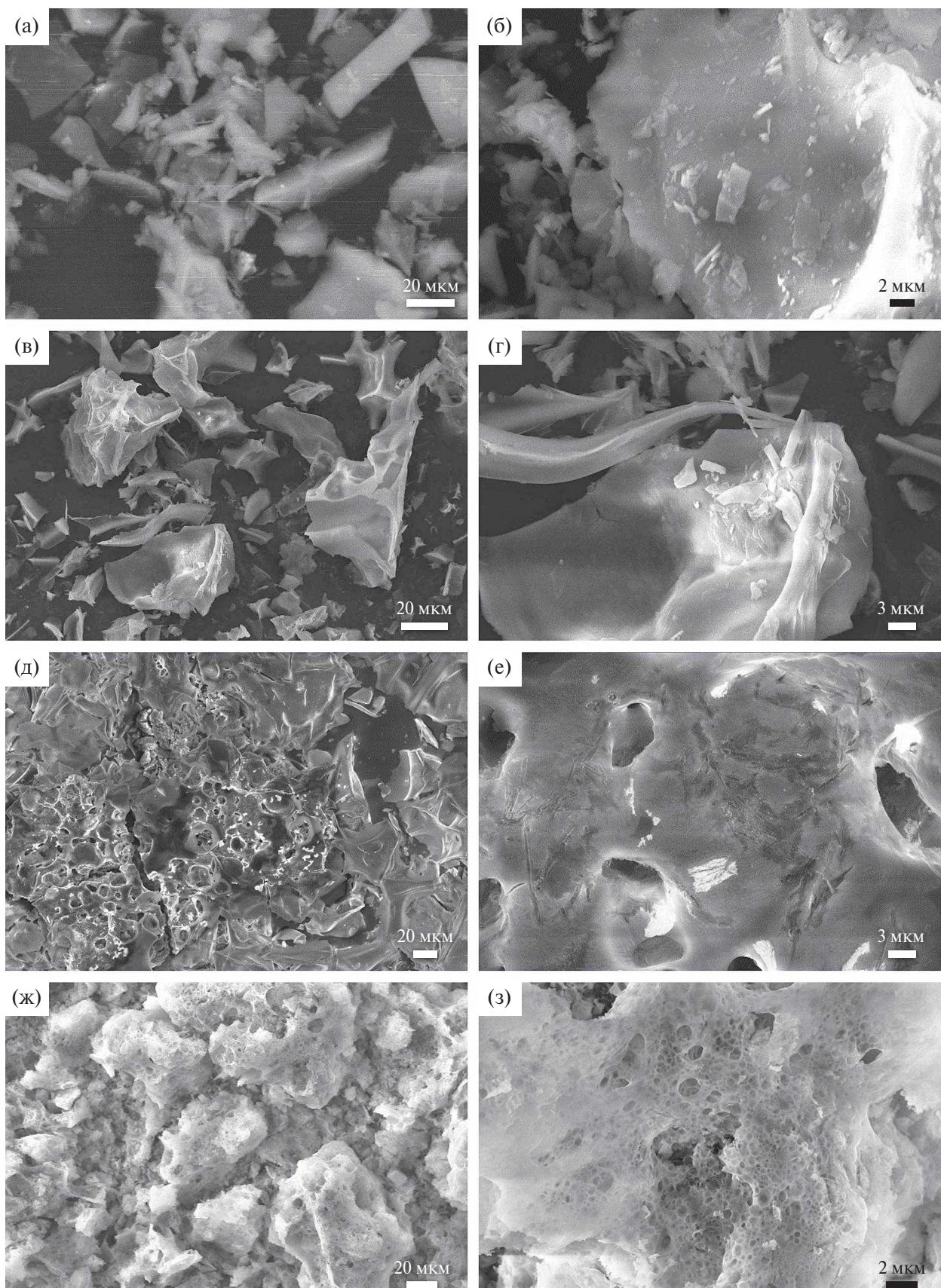
При написании реакций и в расчетах не учитывали молекулярный кислород воздуха, поскольку данные реакции горения могут протекать при его отсутствии за счет внутреннего окислителя в прекурсоре (нитрат). Кроме того, даже при проведении реакции на воздухе часть прекурсора, которая находится не на поверхности и плотно прилегает к стенкам реактора, не имеет доступа к кислороду окружающего воздуха. Поэтому для описания подобных окисительно-восстановительных реакций (горения прекурсоров) с внутренним окислителем и “топливом” могут быть использованы в различной степени формализованные реакции [33], в которых нитратная часть композиции кислой природы учитывается как азотная кислота. Для приготовления прекурсоров отдельно готовили два рабочих раствора, содержащих нитраты соответствующих металлов и органический компонент. Растворы нитратов металлов готовили путем растворения рассчитанных по реакции горения навесок в дистиллированной воде. Растворы полимерных компонентов (концентрация ПВС или ПВП 5 и 10 мас. % соответственно) готовили при нагревании на водяной бане. Растворы глицина и глицерина получали растворением рассчитанных по реакции горения навесок в дистиллированной воде. При этом промежуточные концентрации растворов не определяли. После смешивания раствора нитратов и раствора одного из органических компонентов общий раствор доводили до метки 250.0 см<sup>3</sup> дистиллированной водой. Сжигание прекурсоров проводили в фарфоровых чашках при нагревании на электрической плите для инициации процесса горения. В зависимости от типа органического компонента температура начала горения варьировалась в диапазоне 200–250°C. Окончательную термообработку осуществляли в высокотемпературной печи. На первом этапе проводили обжиг в течение 8 ч при температуре 650°C. Далее каждый из полученных образцов был разделен на две части. Первую часть исследовали без дополнительной термообработки, вторую часть образцов дополнительно выдерживали при температуре 850°C в течение 8 ч с целью изучения влияния температуры окончательной термообработки на фазовый состав, размер и морфологию частиц композита. Рентгенофазовый анализ образцов проводили на дифрактометре D8 Advance в CuK<sub>α</sub>-излучении в интервале углов  $20^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ . Электронную микроскопию образцов осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM 6390 с приставкой JED 2300.

Для оценки антибактериальной активности навеску образца, перетертого в ступке и просе-

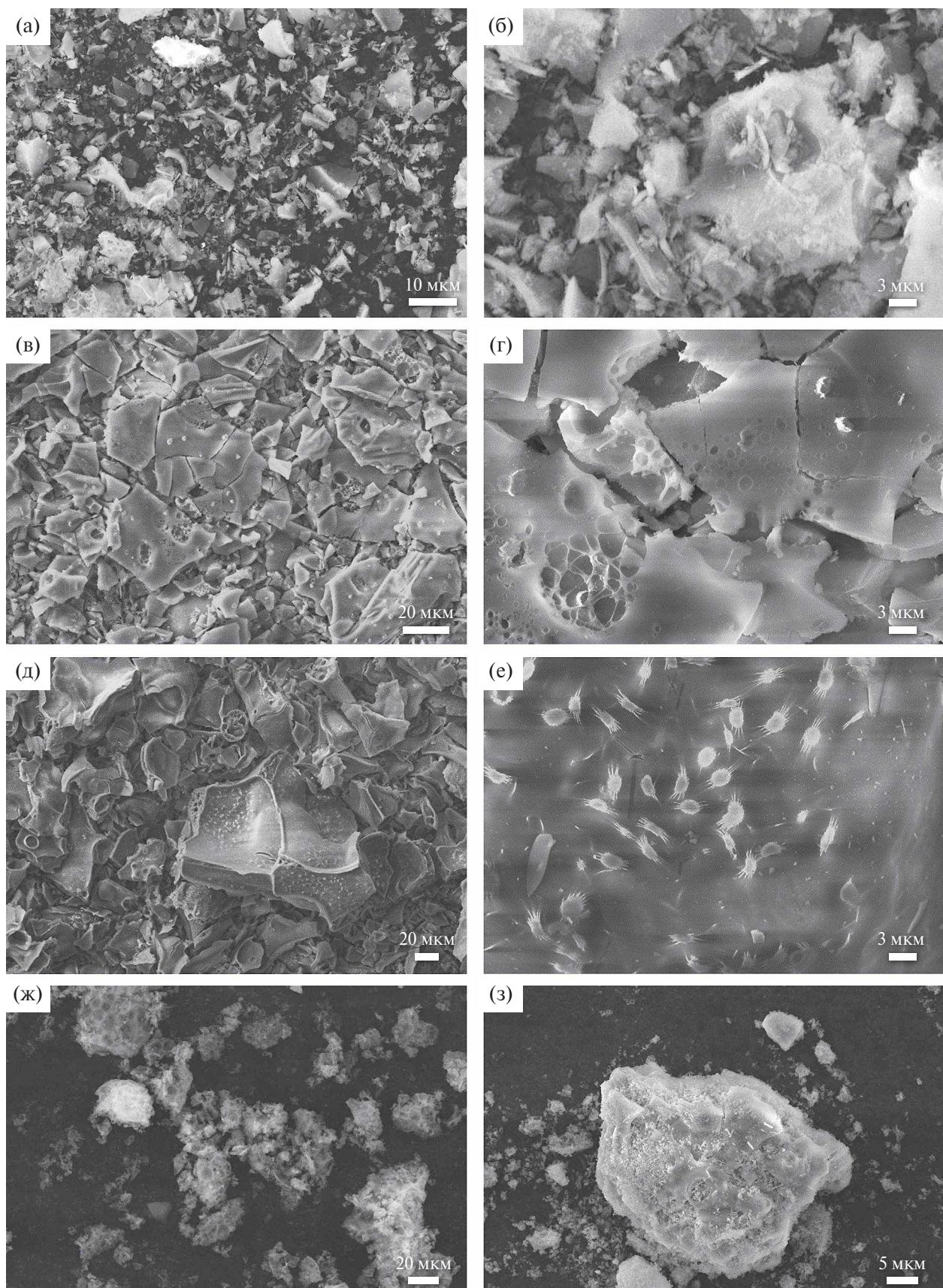
янного через сито, вносили непосредственно в среду для культивирования перед автоклавированием. Образец сравнения – нитрат серебра – вносили после автоклавирования перед разливом сред, когда температура составляла 6–50°C. Для экспериментов брали питательную среду LB без хлорида натрия (10 г/л триптона и 5 г/л дрожжевого экстракта) из 1.5%-ного агар-агара. Автоклавирование проводили в течение 20 мин при 115°C. Использовали культуру кишечной палочки (*E. coli*), штамм TG-2. Ночную культуру бактерии разводили в 10<sup>8</sup> раз, после чего 50 мкл разведенной бактериальной суспензии втирали шпателем Дригальского в тестируемую среду – 20 мл в чашке Петри диаметром 10 см. На следующий день проводили подсчет выросших колоний (на участках 3 × 3 см). Измерения повторяли 5 раз. Достоверность отличий от контрольного варианта без введения порошкового образца или нитрата серебра определяли с использованием непараметрического U-критерия Мана–Уитни. Фотографирование проводили на вторые сутки, чтобы колонии были более заметны. Оптимальный объем вносимой культуры и степень ее разведения были подобраны в предварительном эксперименте. Тестируемая концентрация ионов серебра и его наночастиц составляла 0, 0.4, 1.0 и 2.5 мМ/л с учетом его содержания в образцах 10 мас. %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

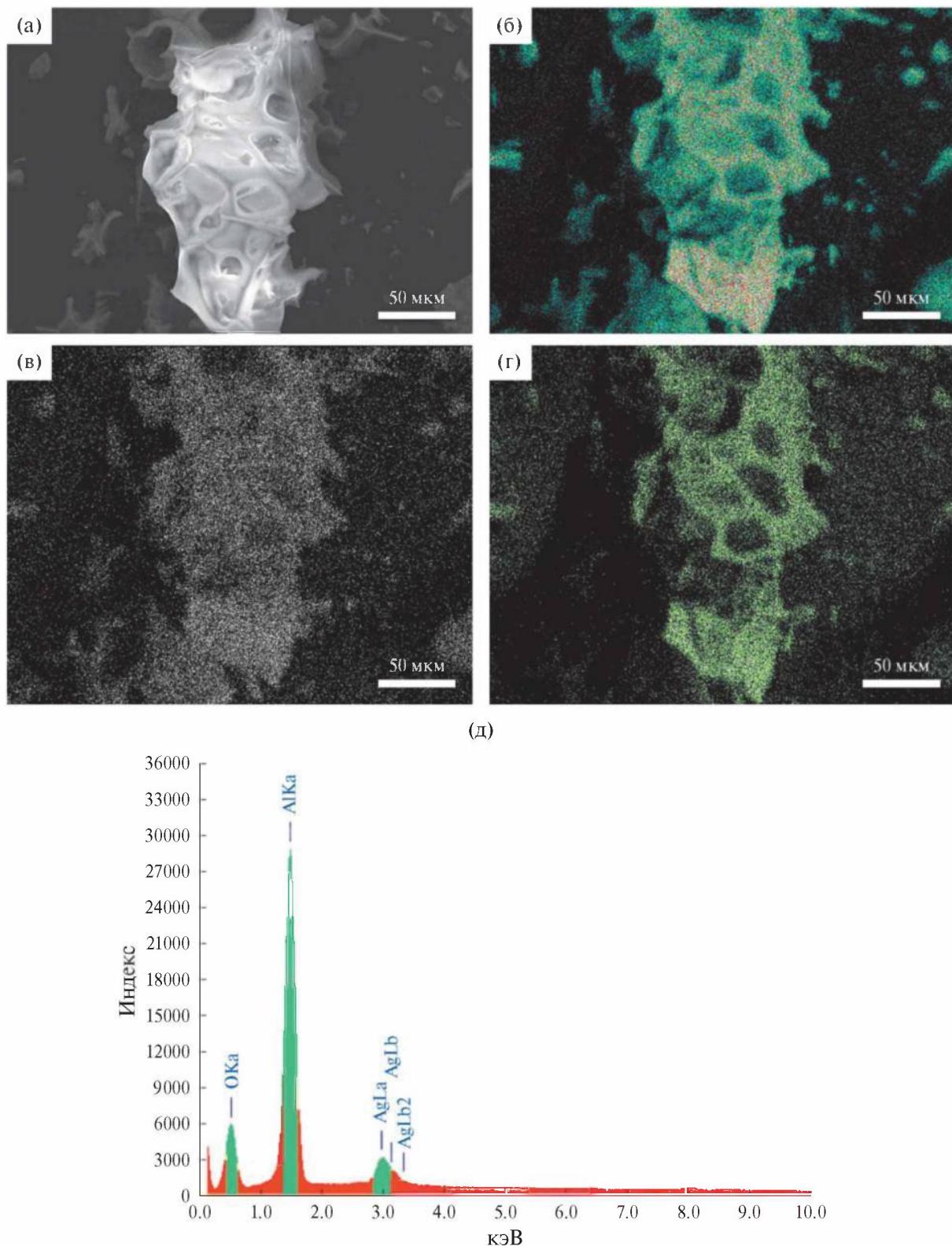
В ходе проведенного синтеза образцов из прекурсоров с ПВС, ПВП, глицином и глицерином были получены дисперсные композиции оксид алюминия–серебро, содержащие частицы и наноструктурированные агрегаты на основе оксида алюминия, на поверхности которых находятся наночастицы серебра разной морфологии (рис. 1, 2). Ансамбли ассоциированных частиц на основе оксида алюминия имеют приемлемые для биомедицинского использования размеры (10–200 мкм), в ансамблях различимы отдельные частицы размером 1–5 мкм. Под биомедицинским использованием в данном случае подразумевается применение данных композитов в качестве наполнителей волокон антибактериальных тканей и местных антисептических препаратов. Указанный интервал размеров частиц (1–200 мкм) приемлем для использования композитов в указанных целях [34]. По данным рентгенофазового анализа, в основе наноструктурированных агрегатов помимо металлического серебра присутствуют такие Al-содержащие фазы, как гидратированный оксид алюминия [30],  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , низкотемпературные модифи-



**Рис. 1.** СЭМ-изображения образцов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—Ag, синтезированных из прекурсоров с различными органическими компонентами: а, б – ПВС, 650°С; в, г – ПВП, 650°С; д, е – глицин, 650°С; ж, з – глицерин, 650°С.



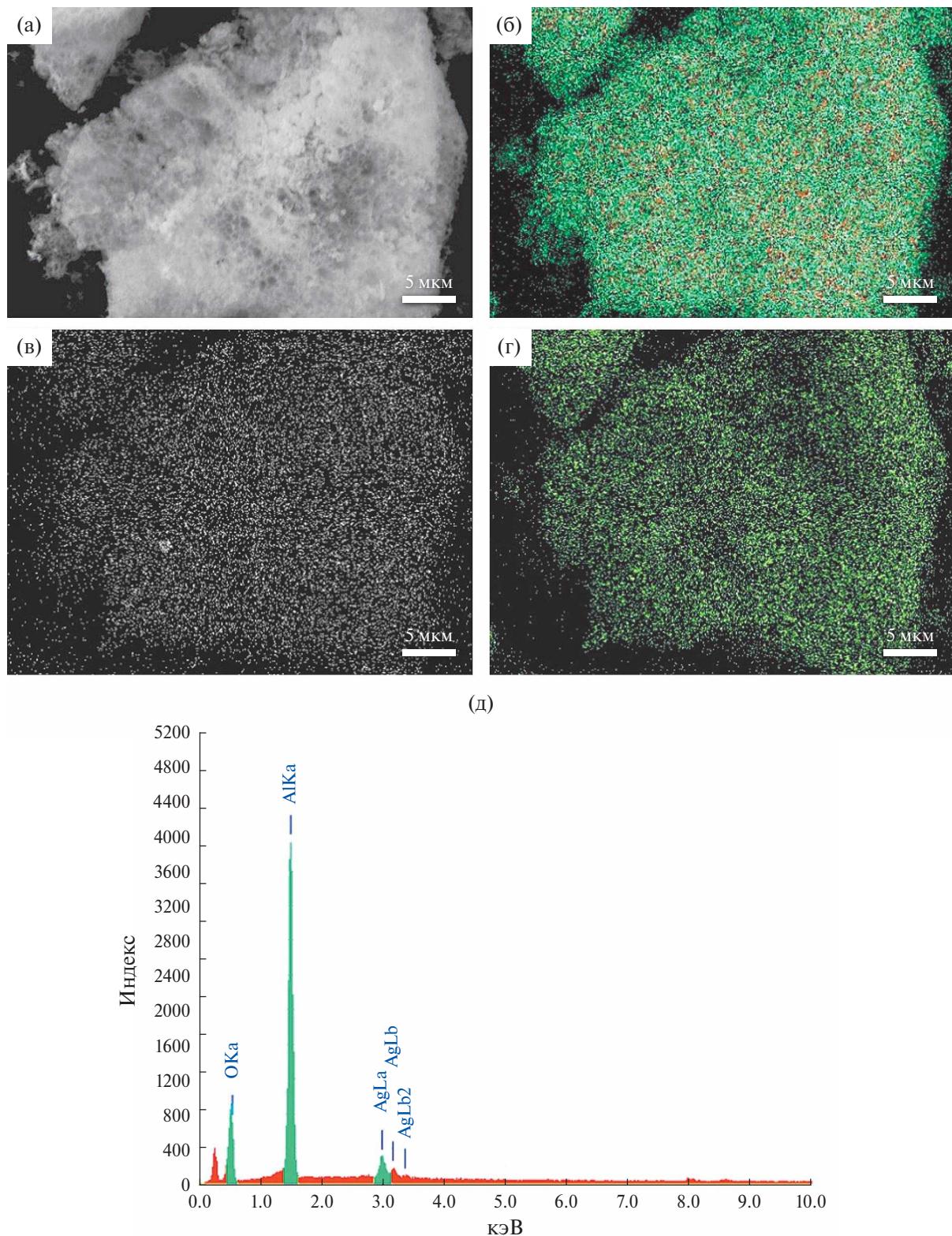
**Рис. 2.** СЭМ-изображения образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ag}$ , синтезированных из прекурсоров с различными органическими компонентами: а, б – ПВС, 850°С; в, г – ПВП, 850°С; д, е – глицин, 850°С; ж, з – глицерин, 850°С.



**Рис. 3.** Результаты энергодисперсионного анализа образца  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –Ag, ПВП, 650°C: а – СЭМ-изображение; карты распределения химических элементов: б – Al, в – Ag, г – O; д – энергодисперсионный спектр.

кации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . На микрофотографиях видно, что наночастицы серебра распределены по поверхности оксида алюминия, причем они плотно

прилегают к этой поверхности. Размер и форма частиц серебра, а также характер их распределения по агрегатам частиц оксида алюминия в



**Рис. 4.** Результаты энергодисперсионного анализа образца  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –Ag, глицерин, 850°C: а – СЭМ-изображение; карты распределения химических элементов: б – Al, в – Ag, г – O; д – энергодисперсионный спектр.

значительной степени зависят от органического компонента, используемого при синтезе. Так, для образцов, полученных из прекурсоров с ПВС и

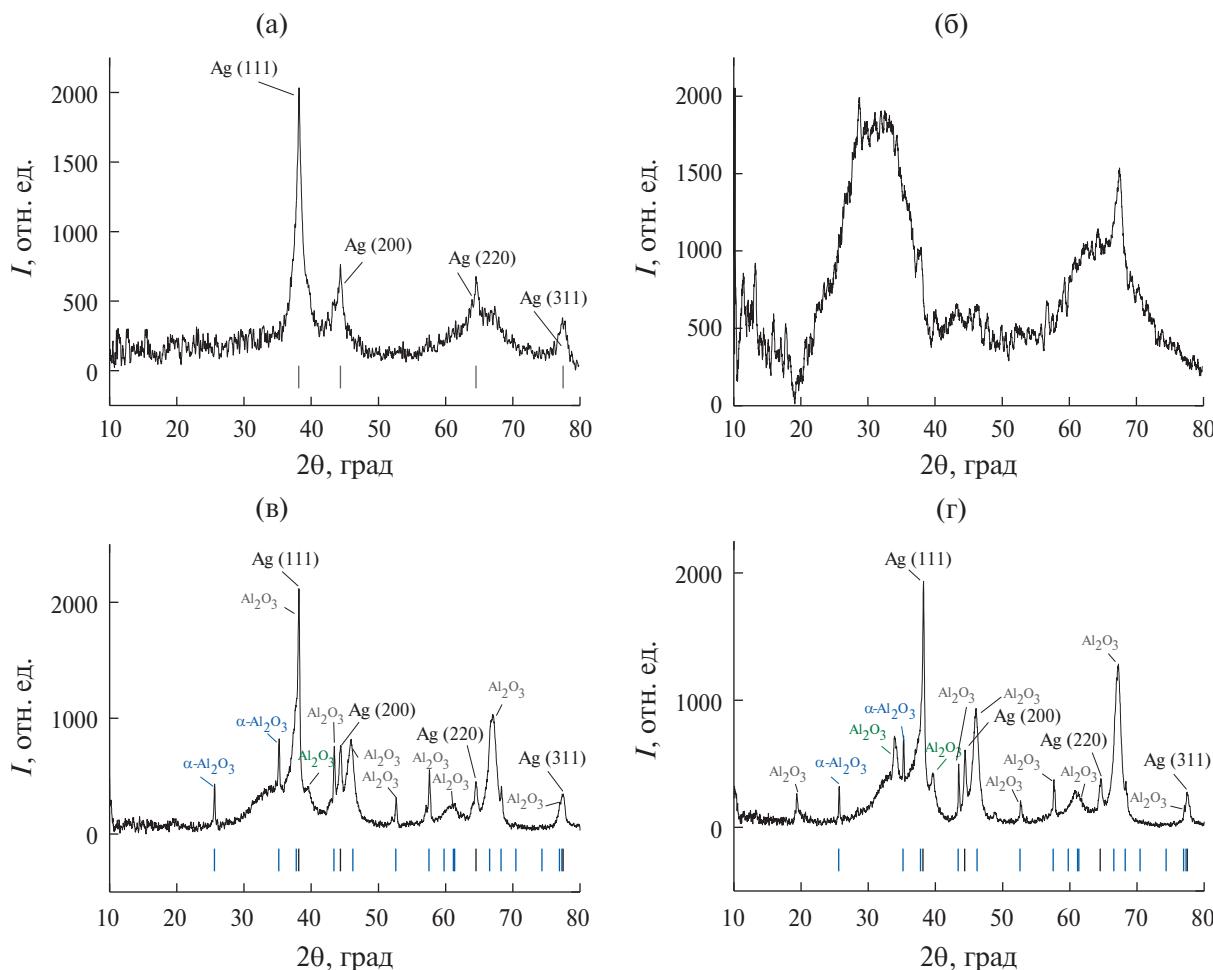
ПВП при 650 и 850°C (рис. 1а–1г, 2а–2г), частицы серебра имеют форму пластин, размер которых варьирует в диапазоне 1–10 мкм. В образце, по-

лученном с глицерином при 850°C (рис. 2ж, 2з), пластины серебра имеют меньшие размеры и игольчатую форму. В образцах, при синтезе которых использовали глицин (рис. 1д, 1е, 2д, 2е), частицы серебра были сильно агрегированы на поверхности оксида алюминия, образуя агрегаты от 1–5 мкм. При увеличении температуры окончательной термообработки образцов с ПВС и глицерином размеры агрегатов частиц оксида алюминия и расположенных на них пластин серебра уменьшались, для образцов с ПВП и глицином – увеличивались. На микрофотографиях серебро выглядит более светлым. Помимо вышеописанных пластинчатых форм серебра в образцах присутствуют наноразмерные частицы более округлой формы (рис. 1, 2). Такие частицы имеют величину от 10 до 100 нм, что укладывается в общепринятые представления о наноразмерных объектах. Можно полагать, что наличие в полученном композиционном материале различных по морфологии и размеру образований металли-

ческого серебра способствует повышению бактерицидных свойств материала на разных этапах его воздействия на биологические среды. Наночастицы наименьших размеров обеспечивают необходимое быстрое действие на вредоносные бактерии в первые моменты контактирования с биологической средой, тогда как более крупные наночастицы могут поддерживать долгосрочную динамику пролонгированного бактерицидного воздействия.

Наличие наноразмерных частиц серебра и их равномерное распределение по поверхности частиц и агрегатов частиц оксида алюминия были определены с помощью энергодисперсионного анализа (рис. 3, 4).

Рентгенофазовый анализ образцов показал наличие металлического серебра (COD ID: 1100136) во всех исследуемых образцах (рис. 5). В образцах, термообработанных при температуре 650°C, можно предположить наличие

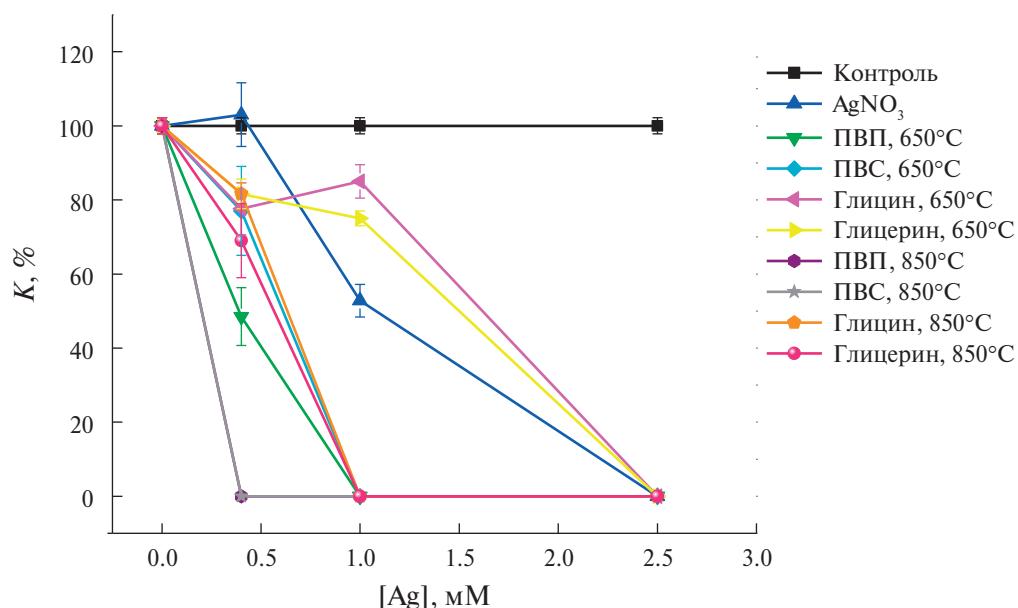


**Рис. 5.** Рентгенограммы образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3$ –Ag, синтезированных из прекурсоров с различными органическими компонентами: а – ПВС, 650°C; б – ПВП, 650°C; в – ПВС, 850°C; г – ПВП, 850°C (штрихиagramмами обозначены фазы металлического серебра (COD ID: 1100136) (черный),  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (COD ID: 1000017) (синий)).

смеси фаз гидратированного оксида алюминия (рис. 5а, 5б), тогда как для образцов, выдержанных при 850°C (рис. 5в, 5г), обнаружены такие Al-содержащие фазы, как гидратированный оксид алюминия [30],  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (COD ID: 1000017), низкотемпературные модификации  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . К низкотемпературным модификациям оксида алюминия относятся  $\gamma$ -,  $\eta$ - и  $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ , получаемые при прокаливании при температуре 500–700°C бемита, байерита и гидрагилита соответственно [31, 32, 35]. Разница между низкотемпературными модификациями оксида алюминия ничтожно мала, надежного метода идентификации не существует [36], поэтому в рамках данной работы содержание конкретных низкотемпературных модификаций не определяли. На экспериментальных рентгенограммах (рис. 5в, 5г) на возможность формирования высокотемпературной фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  указывают максимумы при значениях углов рассеяния  $\sim 25^\circ$  и  $\sim 35^\circ$ , нехарактерные для низкотемпературных модификаций [37]. На наличие модификаций шпинельного типа указывают нехарактерные для  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  максимумы при  $\sim 34^\circ$  и  $\sim 39^\circ$  [38]. Появление максимума при  $\sim 20^\circ$  (рис. 5г) свидетельствует о том, что часть атомов алюминия занимает “нешпинельные” позиции [38].

Оценка антибактериальной активности полученных нанокомпозиций показала положительные результаты (рис. 6). Как и предполагалось, условия синтеза композиций влияют на их целевые свойства. Композиции, полученные из пре-

курсов, содержащих ПВС и ПВП в качестве органического компонента, окончательная термообработка которых проводилась при температуре 850°C, обладают максимальными бактерицидными характеристиками, они подавляют рост колоний *E. coli* аналогично нитрату серебра (табл. 1). Кроме того, при повышении температуры окончательной термообработки наблюдается повышение антибактериальной активности для всех композиций. Образцы оксида алюминия, полученные в аналогичных с данными композициями условиях, но не содержащие серебра, не обладают бактерицидной активностью в условиях проведенных экспериментов. Следует отметить, что в диапазоне температур термообработки получаемых образцов происходит дегидратация оксида алюминия, о чем свидетельствует появление его безводных форм. Нельзя исключить, что при этом происходит процесс формирования наиболее оптимальных по свойствам частиц оксида алюминия, имеющих форму пластин, как носителя высокодисперсного серебра. Частицы серебра в этом случае также приобретают форму нанопластин. Авторы [39] отмечают повышенную цитотоксичность частиц в виде нанопластин. В то же время более высокие температуры термообработки по мере приближения к температуре плавления серебра будут приводить к его самоагрегированию. Поэтому верхний диапазон был ограничен 850°C. Таким образом, можно предположить, что более предпочтительной является такая морфология,



**Рис. 6.** Концентрационные зависимости процентного отношения колонииобразующих единиц в исследуемых образцах, синтезированных с различными органическими компонентами, к колонииобразующим единицам в контрольном опыте.

**Таблица 1.** Влияние препаратов на рост тест-культуры, процентное отношение количества колониеобразующих единиц в образце к количеству колониеобразующих единиц в контрольном опыте

Образец	[Ag], мМ			
	0	0.4	1	2.5
Контроль (без добавок)	100 ± 2.2	—	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100 ± 2.3	—	—	—
AgNO <sub>3</sub>	100 ± 2.2	100 ± 8.6	52.8 ± 4.4*	0 ± 0*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90 мас. %), Ag (10 мас. %), ПВП, 8 ч, 650°C	100 ± 2.2	48.5 ± 7.8*	0 ± 0*	0 ± 0*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90 мас. %), Ag (10 мас. %), ПВС, 8 ч, 650°C	100 ± 2.2	77 ± 12*	0 ± 0*	0 ± 0*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90 мас. %), Ag (10 мас. %), глицерин, 8 ч, 650°C	100 ± 2.2	77.6 ± 7*	85 ± 4.5*	0 ± 0*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90 мас. %), Ag (10 мас. %), ПВП, 8 ч, 650°C; 8 ч, 850°C	100 ± 2.2	0 ± 0*	0 ± 0*	0 ± 0*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90 мас. %), Ag (10 мас. %) ПВС, 8 ч, 650°C; 8 ч, 850°C	100 ± 2.2	0 ± 0*	0 ± 0*	0 ± 0*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90 мас. %), Ag (10 мас. %), глицерин, 8 ч, 650°C; 8 ч, 850°C	100 ± 2.2	81.7 ± 3*	0 ± 0*	0 ± 0*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90 мас. %), Ag (10 мас. %), глицерин, 8 ч, 650°C; 8 ч, 850°C	100 ± 2.2	69 ± 10*	0 ± 0*	0 ± 0*

\* Отличия достоверны от контроля при  $p < 0.01$ .

при которой частицы серебра в виде тонких небольших пластин плотно прилегают к агрегатам частиц оксида алюминия, распределяясь по их поверхности, что наблюдается в случае образцов с ПВС и ПВП, выдержаных при более высокой температуре. Результаты экспериментов показывают, что полученные композиции имеют перспективы использования, например, в качестве наполнителя антисептических материалов.

В табл. 1 для сравнения представлены значения антибактериальной активности раствора нитрата серебра как эффективного бактерицидного средства, применяемого в медицине в качестве местного антисептического препарата, антибактериального препарата и др. [40]. Представлены показатели по росту колоний для оксида алюминия, не содержащего добавок серебра. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии антибактериальной активности у чистого оксида алюминия.

Следует отметить важный момент. Получение композиций оксид алюминия–серебро в одном цикле позволяет упростить технологию, создает экономию времени и энергии. Кроме того, процесс горения нитрат-органических прекурсоров протекает с выделением в окружающую среду значительно меньших количеств вредных веществ (монооксида углерода, оксидов азота) [12] по сравнению, например, с термическим разло-

жением собственно солевых форм. Это обеспечивается за счет окислительно-восстановительного взаимодействия компонентов прекурсоров одновременно с каталитическим воздействием промежуточных и целевых твердофазных продуктов на выделяющиеся газообразные продукты [11]. В частности, при этом возможно инициирование реакции между монооксидом углерода и оксидами азота с образованием молекулярного азота и малотоксичного диоксида углерода [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования, результаты которых позволили установить возможность получения из нитрат-органических прекурсоров в одном реакционном цикле нанокомпозиций, содержащих оксид алюминия и частицы металлического серебра. Такие композиции обладают приемлемыми для практического применения размерами частиц и высокой бактерицидной активностью, наличие которой показано в экспериментах с культурами кишечной палочки (*E. coli*). Биологическая активность полученных образцов меняется в зависимости от условий их получения. Наилучшими характеристиками обладают материалы, полученные из прекурсоров с ПВС и ПВП после дополнительной термообработки при 850°C. Синтез антибактериальных композиций в одном цикле из нитрат-органических

прекурсоров путем реализации процесса их горения с последующей термообработкой позволяет упростить методику получения и снизить выбросы вредных веществ в атмосферу, создает экономию времени и затрат энергии. Большая часть имеющихся литературных данных говорит об относительной безопасности оксида алюминия для организма животных и человека, хотя имеются некоторые сведения о его негативном действии [41]. Поэтому одной из наиболее перспективных областей применения данного композита, обладающего бактерицидным действием, может быть его использование в качестве наполнителя для антибактериальных волокон (тканей).

К возможным механизмам бактерицидного действия серебра относят и генерирование в средах, содержащих воду, активных форм кислорода [1]. По этой причине представляет интерес изучение возможности тестирования фотокатализической активности наночастиц серебра различной морфологии по отношению к реакциям деструкции (обесцвечивания) органических красителей [42, 43] аналогично реакциям Фентона [35, 44], а также (при установлении такой активности) сопоставление ее с антибактериальными свойствами. В связи с этим перспективным направлением исследований является разработка косвенного метода оценки бактерицидной активности по фотокатализической активности серебросодержащих материалов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 123031300049-8).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gabrielyan L.S., Trchounian A.A. // J. Belarus. State University. Biology. 2020. V. 3. P. 64.*  
<https://doi.org/10.33581/2521-1722-2020-3-64-71>
- Meleshko A.A., Afinogenova A.G., Afinogenov G.E. et al. // Russ. J. Infection Immunity. 2020. V. 10. № 4. P. 639.*  
<https://doi.org/10.15789/2220-7619-AIA-1512>
- Dorovskikh S.I., Vikulova E.S., Sergeevichev D.S. et al. // Coatings. 2023. V. 13. P. 1269.*  
<https://doi.org/10.3390/coatings13071269>
- Smolle M.A., Bergovec M., Scheipl S. et al. // Scient. Rep. 2022. V. 12. P. 13041.*  
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-16707-0>
- Sergeevichev D.S., Dorovskikh S.I., Vikulova E.S. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2024. V. 25. № 2. P. 1100.*  
<https://doi.org/10.3390/ijms25021100>
- Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Личикин Г.В. // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 3. С. 242.*
- Степанов А.Л. // Журн. техн. физ. 2004. Т. 74. № 2. С. 1.*
- Спешилов И.О., Вартанян М.А., Ваграмян Т.А. // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 3. С. 59.*
- Закатилова Е.И., Уянга Т., Меркушкин А.О., Обручиков А.В. // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28. № 6. С. 95.*
- Максимов Г.В., Сазонтова Т.Г., Коваленко С.С. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2015. Т. 56. № 3. С. 158.*
- Ostroushko A.A., Russkikh O.V. // Nanosyst.: Phys. Chem. Math. 2017. V. 8. № 4. P. 476.*  
<https://doi.org/10.17586/2220-8054-2017-8-4-476-502>
- Остроушко А.А., Максимчук Т.Ю., Пермякова А.Е., Русских О.В. // Журн. неорган. химии. Т. 67. № 6. С. 727.*  
<https://doi.org/10.31857/S0044457X22060186>
- Остроушко А.А., Адамова Л.В., Ковеза Е.В. и др. // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 92. № 3. С. 423.*  
<https://doi.org/10.7868/S0044453718030214>
- Varma A., Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Manukyan K.V. // Chem. Rev. 2016. V. 116. № 23. P. 14493.*  
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00279>
- Chick L.A., Pederson L.R., Maupin G.D. et al. // Mater. Lett. 1990. V. 10. № 12. P. 6.*  
[https://doi.org/10.1016/0167-577X\(90\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0167-577X(90)90003-5)
- Aruna S.T. Solution combustion synthesis. Concise Encyclopedia of Self Propagating High Temperature Synthesis. 2017. P. 344.*
- Popkov V.I., Almjasheva O.V., Nevedomskyi V.N. et al. // Ceram. Int. 2018. V. 44. № 17. P. 20906.*  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.097>
- Martinson K.D., Belyak V.E., Sakhno D.D. et al. // J. Alloys Compd. 2022. V. 894. P. 162554.*  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162554>
- Ostroushko A.A., Russkikh O.V., Maksimchuk T.Yu. // Ceram. Int. 2021. V. 47. № 15. P. 21905.*  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.20>
- Ломанова Н.А., Томкович М.В. Данилович Д.П. и др. // Неорган. материалы. 2020. Т. 56. № 12. С. 1342.*  
<https://doi.org/10.31857/S0002337X20120118>
- Popkov V.I., Almjasheva O.V., Semenova A.S. et al. // J. Mater. Sci: Materials in Electronics. 2017. V. 28. № 10. P. 7163.*  
<https://doi.org/10.1007/s10854-017-6676-1>
- Almjasheva O.V., Lomanova N.A., Popkov V.I. et al. // Nanosyst.: Phys. Chem. Math. 2019. V. 10. № 4. P. 428.*  
<https://doi.org/10.17586/2220-8054-2019-10-4-428-437>
- Zang S., Chang S., Shahzad M.B. et al. // Rev. Adv. Mater. Sci. 2019. V. 58. P. 82.*  
<https://doi.org/10.1515/rams-2019-0010>
- Wilczewska A.Z., Niemirowicz K., Markiewicz K.H. et al. // Pharmacol. Rep. 2012. V. 64. № 5. P. 1020.*  
[https://doi.org/10.1016/S1734-1140\(12\)70901-5](https://doi.org/10.1016/S1734-1140(12)70901-5)

25. Kapoor S., Hegde R., Bhattacharyya A.J. // J. Control. Release. 2009. V. 140. № 1. P. 34.  
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2009.07.015>
26. Das S.K., Kapoor S., Yamada H. et al. // Micropor. Mesopor. Mat. 2009. V. 118. № 1–3. P. 267.  
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2008.08.042>
27. Добровольский Д.С., Беловощев Н.А., Насырова Л.А. и др. // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31. № 13. С. 31.
28. Fedoročková A., Sučík G., Plešingerová B. et al. // RSC Adv. 2020. V. 10. P. 32423.  
<https://doi.org/10.1039/D0RA06544G>
29. Лямина Г.В., Илела А.Э., Двилис Э.С. и др. // Бутлеровские чтения. 2013. Т. 33. № 3. С. 55.
30. Остроушко А.А., Вылков А.И., Жулanova Т.Ю. и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2023. Т. 15. С. 799.  
<https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.799>
31. Петина Л.П., Левинтер М.Е. // Изв. ВУЗов. Химия и хим. технология. 1980. Т. 23. № 4. С. 919.
32. Gates B.K., Katzer J.R., Schuit G.C.A. Chemistry of Catalytic Processes. N.Y.: McCraw-Hill Book Company, 1979. 464 р.  
Гейтс Б., Кэтцер Дж., Шуйт Д. Химия каталитических процессов. М.: Мир, 1981. 342 с.
33. Ostroushko A.A. // Inorg. Mater. 2004. V. 40. № 3. P. 259.  
<https://doi.org/10.1023/B:INMA.0000020524.35838.de>
34. Галимзянова Р.Ю. Современные композиционные материалы в производстве медицинской техники. Казань, 2021. 89 с.
35. Липпенс Б.К., Стеггерда И.И. Активная окись алюминия. Строение и свойства адсорбентов и катализаторов / Под ред. Линсена Б.Н. М.: Мир, 1973. 288 с.
36. Чукин Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М., 2010. 288 с.
37. Бакшеев Е.О. Разработка технологии производства трехмаршрутных катализаторов с высокой каталитической активностью и устойчивостью к термической дезактивации. Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2023.  
[https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/128095/1/urfu2579\\_d.pdf; urfu2579\\_d.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/128095/1/urfu2579_d.pdf; urfu2579_d.pdf)
38. Алешина Л.А., Сидорова О.В., Струневская А.Л. // Тр. Кольского НЦ РАН. 2018. Т. 9. № 2. С. 498.  
<https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.498-502>
39. Коровин М.С., Фоменко А.Н., Бакина О.В., Лернер М.И. // Сибирский онкологический журнал. 2016. Т. 15. № 6. С. 35.  
<https://doi.org/10.21294/1814-4861-2016-15-6-35-41>
40. Привольнев В.В., Забросаев В.С., Даниленков Н.В. // Вестн. Смоленской гос. мед. академии. 2015. Т. 14. № 3. С. 85.
41. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Степанков М.С., Игнатова А.М. // Экология человека. 2018. № 5. С. 9.
42. Thomas J., Periakaruppan P., Thomas V. et al. // RSC Adv. 2018. V. 8. P. 41288.  
<https://doi.org/10.1039/C8RA08893D>
43. Zhang Y., Liu J., Kang Y.S. et al. // Nanoscale. 2022. V. 14. P. 11909.  
<https://doi.org/10.1039/D2NR02665A>
44. Роженцев Д.А., Мансуров Р.Р., Ткачев Н.К. и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2021. Т. 13. С. 919.  
<https://doi.org/10.26456/pcascnn/2021.13.919>

## PREPARATION AND ANTIBACTERIAL PROPERTIES OF ALUMINIUM OXIDE AND SILVER NANOCOMPOSITES

A. A. Ostroushko<sup>a,\*</sup>, A. E. Permyakova<sup>a</sup>, T. Yu. Zhulanova<sup>a,b</sup>, A. A. Ermoshin<sup>a</sup>,  
A. A. Melentsova<sup>c</sup>, R. R. Mansurov<sup>a</sup>, D. K. Kuznetsov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002 Russia*

<sup>b</sup>*Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620066 Russia*

<sup>c</sup>*Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620108 Russia*

*\*e-mail: alexander.ostroushko@urfu.ru*

This work has demonstrated the possibility of obtaining dispersed nanocompositions based on aluminium oxide and metallic silver. The compositions can be obtained in a single reaction cycle using precursors in the form of aqueous solutions containing aluminium and silver nitrates and an organic component: polyvinyl alcohol, polyvinyl pyrrolidone, glycine, glycerol. Electron microscopy and X-ray studies have shown that silver nanoparticles are in contact with the surface of alumina aggregates containing phases of hydrated aluminium oxide,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , low temperature modifications of aluminium oxide. The absence of photocatalytic activity of the samples in the degradation reactions of methyl orange dye is shown. At the same time, the obtained samples of compositions possess antibacterial properties acceptable for practical application. The samples obtained from precursors with polyvinyl alcohol and polyvinylpyrrolidone, subjected to a final heat treatment at a temperature of 850 °C for 8 hours, had the best characteristics in this respect during experiments on cultures of *Escherichia coli* (*E. coli*).

**Keywords:** aluminium oxide, silver, nanocompositions, synthesis in combustion reactions, bactericidal properties