

# ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПЛАСТИН СЕРЕБРА ПОЛИОЛЬНЫМ МЕТОДОМ В ПРИСУТСТВИИ ЭТОКСИЗАМЕЩЕННОЙ КАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ И ГЛЮКОЗЫ

© 2022 г. Т. А. Борисенко<sup>а</sup>, О. А. Логутенко<sup>а,\*</sup>, А. И. Титков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> *Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук,  
ул. Кутателадзе 18, Новосибирск, 630128 Россия*

*\*e-mail: ologutenko@solid.nsc.ru*

Поступило в редакцию 23 марта 2022 г.

После доработки 20 апреля 2022 г.

Принято к печати 21 апреля 2022 г.

Полчены нанопластины серебра треугольной и шестиугольной формы восстановлением нитрата серебра(I) в этиленгликоле в присутствии натриевой соли 2-[2-(2-метоксиэтокси)этокси]уксусной кислоты и глюкозы. Полученные частицы охарактеризованы методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии. Присутствие в реакционной смеси глюкозы и NaOH позволяет снизить температуру синтеза до 30°C, увеличить выход нанопластин до 70% и уменьшить их толщину до 25 нм.

**Ключевые слова:** серебро, нанопластины, 2-[2-(2-метоксиэтокси)этокси]уксусная кислота, глюкоза, этиленгликоль, восстановление

**DOI:** 10.31857/S0044460X2206018X, **EDN:** CPDKSD

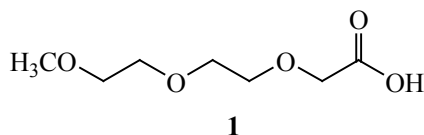
Наночастицы серебра широко применяются в различных областях, включая катализ, медицину, оптику и электронику. Наночастицы серебра, золота, меди, никеля, алюминия и цинка активно применяются в составах паст и чернил для 2D- и 3D-печати электропроводящих элементов гибкой печатной электроники [1–4]. Наибольшее распространение в печатной электронике получили токопроводящие чернила и пасты на основе серебра благодаря его уникальным свойствам – высокой электропроводности и устойчивости к окислению.

Для синтеза наночастиц серебра используют различные физические и химические методы [5], большинство из которых позволяют получать термодинамически наиболее устойчивые частицы сферической формы. Синтез анизотропных наноструктур, в том числе нанопластин, более актуален, поскольку их оптические, электронные и

каталитические свойства превосходят свойства сферических наночастиц. Серебряные пленки, полученные при нанесении чернил на основе анизотропных наночастиц серебра на пластиковые подложки, спекаются при более низких температурах, более однородны, имеют меньшее электрическое сопротивление и улучшенные механические свойства по сравнению с аналогичными пленками из сферических частиц [6, 7].

Химическое восстановление ионов металлов или их комплексов наиболее распространено и эффективно при получении наночастиц различной формы и анизотропии. Для обеспечения анизотропного роста обычно используют стабилизаторы, которые способны избирательно адсорбироваться на различных гранях кристаллов и таким образом препятствовать их росту в заблокированных направлениях. В большинстве

Схема 1.



известных методов в качестве стабилизаторов, в присутствии которых формируются анизотропные частицы серебра, широко используют цитрат и поли(винилпирролидон) [6]. Благодаря селективному связыванию цитрат-иона с гранью {111} зародыша серебра, происходит латеральный рост частиц, а вдоль вертикальной оси он заблокирован, в результате образуются нанопластины [8, 9]. Кроме цитрата, селективной адгезией к граням {111} Ag обладают и многие другие двух- и трехосновные карбоновые кислоты [10]. Серебряные микропластины со средней длиной ребра около 1.5 мкм и толщиной 100 нм получены экстракционно-сольвотермическим методом в присутствии октан-1-ола, который играет важную роль в формировании пластин [11]. Нанопластины серебра треугольной и гексагональной формы получены восстановлением нитрата серебра этиленгликолем в присутствии полиакриламида [12]. Сильное взаимодействие между аминогруппами полиакриламида и ионами  $\text{Ag}^+$  снижает скорость восстановления ионов серебра и способствует образованию тонких нанопластин. Количество стабилизаторов с селективной адсорбцией, которые можно было бы успешно использовать для получения различных 1D- или 2D-структур серебра, весьма ограничено. Кроме того, температура разложения поли(винилпирролидона), октиламина, полиэтиленimina и полиакриламида слишком высока, и частицы, стабилизированные этими лигандами, нельзя использовать в чернилах для печати на термочувствительных полимерных подложках.

Практически отсутствуют данные об использовании полиольного метода для синтеза пластин серебра, в основном такие частицы получают в водной среде. Нами представлены результаты исследования восстановления ионов серебра этиленгликолем в присутствии натриевой соли 2-[2-(2-метоксиэтокси)этокси]уксусной кислоты (NaR) и глюкозы, найдены оптимальные

условия получения треугольных и шестиугольных структур серебра, предложен простой метод синтеза нанопластин серебра размером от 140 до 240 нм и толщиной от 25 до 40 нм, которые можно использовать в качестве электропроводящего металлического наполнителя в составах чернил и паст для 2D- и 3D-печати.

Ожидалось, что нанопластины серебра, стабилизированные оксиэтилированной карбоновой кислотой, за счет кислорода в ее углеводородной цепи будут хорошо диспергироваться в широком классе полярных растворителей, в том числе в спиртах и эфирах гликолей, что позволит получать на их основе стабильные коллоидные системы, которые можно будет использовать для приготовления функциональных чернил для струйной печати, а также клеев и паст. Простота предложенного метода состоит в том, что для формирования анизотропных структур, в том числе пластин, для стабилизации граней {111} частиц серебра не требуется использовать многокомпонентные смеси, такие как поли(винилпирролидон), перекись водорода и цитрат натрия, или предварительно синтезированные зародыши. Основное внимание уделено исследованию влияния различных параметров синтеза на образование нанопластин серебра восстановлением его ионов этиленгликолем в присутствии 2-[2-(2-метоксиэтокси)этокси]уксусной кислоты (HR, схема 1) **1** и глюкозы (Glu). Ранее было найдено, что в результате монодентатной и мостиковой бидентатной координации карбоксилат-иона кислоты **1** с серебром возникает эффективная стабилизация полученных наночастиц [13, 14].

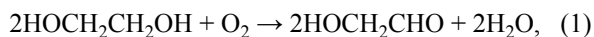
Для получения нанопластин концентрация  $\text{AgNO}_3$  в исходном растворе может быть относительно высокой (0.5–1.0 моль/л), а для формирования плоских частиц серебра треугольной и шестиугольной формы оптимально мольное соотношение стабилизатора **1** к серебру 3:1 [15]. При меньших соотношениях выход нанопластин незначителен, а при более высоких размер частиц уменьшается, и они образуют бесформенные агрегаты. Температуру восстановления изменяли в интервале 25–150°C, а время восстановления при фиксированной температуре варьировали от 3 до 72 ч. Увеличение времени восстановления не влияет на полноту протекания реакции и на характеристики образующихся частиц. Мольные отно-

**Таблица 1.** Характеристика наночастиц серебра, полученных восстановлением  $\text{AgNO}_3$  в этиленгликоле в различных экспериментальных условиях

$\text{Ag}^+:\text{NaR}$	$\text{Ag}^+:\text{глюкоза}$	$\text{Ag}^+:\text{NaOH}$	$T, ^\circ\text{C}$	Время, ч	Размер частиц, нм	Морфология
1:0	1:0	1:0	30	3	200–800	Неправильные полиэдры
1:3	1:0	1:0	30	12	2–5	Наночастицы
1:3	1:0	1:0,1	30	72	$l$ 170 $d$ 30	Неправильные полиэдры и небольшая доля нанопластин
1:3	1:1	1:0	30	72	$l$ 170 $d$ 25	Треугольные, шестиугольные пластины (40%) и полиэдры (60%)
1:3	1:1	1:0	40	24	$l$ 140 $d$ 35	Треугольные, шестиугольные пластины (63%) и полиэдры (37%)
1:3	1:2	1:0	30	72	$l$ 240 $d$ 40	Треугольные, шестиугольные пластины (57%) и полиэдры (43%)
1:3	1:2	1:0	40	5	$l$ 150 $d$ 70	Однородные призмы
1:3	1:4	1:0	30	72	$l$ 130 $d$ 40	Треугольные, шестиугольные пластины (60%) и полиэдры (40%)
1:3	1:6	1:0	30	72	$l$ 200 $d$ 30	Треугольные, шестиугольные пластины (50%) и полиэдры (50%)
1:3	1:0	1:2	30	3	20–30	Почти круглые нанопластины
1:3	1:0	1:4	30	3	10–20	Почти круглые нанопластины
1:3	1:0	1:8	30	3	20–80	Агрегаты частиц
1:3	1:2	1:0.1	30	72	$l$ 160 $d$ 25	Треугольные, шестиугольные пластины (70%) и полиэдры (30%)
1:3	1:0	1:0.1	30	72	$l$ 170 $d$ 30	Неправильные полиэдры (73%) и нанопластины (23%)

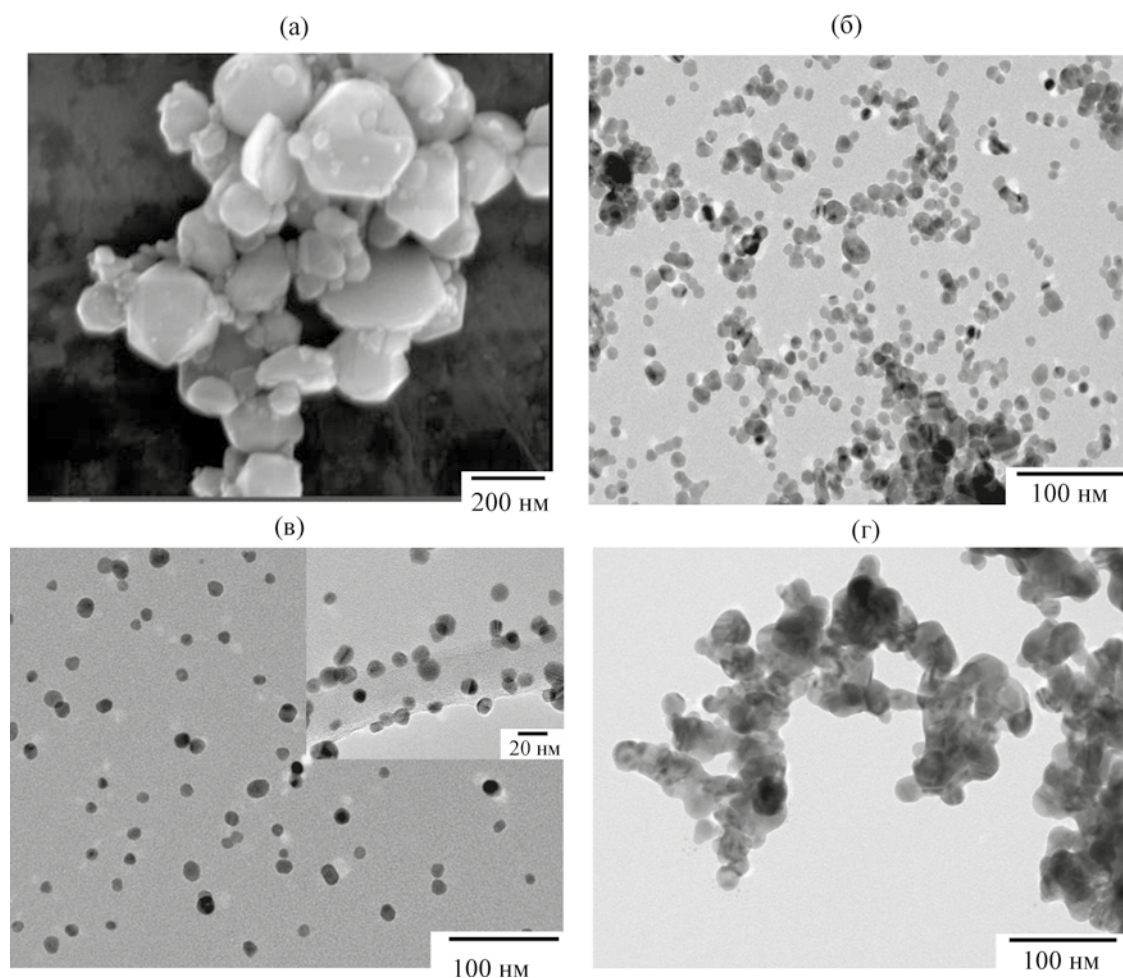
шения глюкозы и NaOH к серебру варьировали от 1:1 до 6:1 и от 0:1 до 0.1:1 соответственно. Данные о составе, размере и морфологии частиц серебра, полученных в этих условиях, приведены в табл. 1.

Согласно литературным данным, в полиольном методе с участием этиленгликоля восстановителем является гликолевый альдегид, образующийся при окислении этиленгликоля кислородом воздуха при нагревании (1), (2) [16].



В заметных количествах гликолевый альдегид образуется при 140–150°C [17], однако при более

низкой температуре в качестве восстановителя может выступать сам этиленгликоль [18]. Проведенные нами исследования показали, что в отсутствие глюкозы при комнатной температуре восстановление ионов серебра этиленгликолем в присутствии натриевой соли кислоты **1** протекает крайне медленно и приводит к образованию наночастиц серебра размером 2–5 нм с очень низким выходом. При повышении температуры до 40°C через 5 ч образуется смесь треугольных и гексагональных нанопластин серебра размером 150–200 и 100–150 нм соответственно и толщиной ~30 нм (за длину пластин принимали их средний продольный размер, который оценивали по данным электронной микроскопии). В полученном порошке присутствовали многогранники неправильной фор-



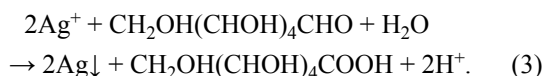
**Рис. 1.** Микрофотографии наночастиц серебра, полученных в отсутствие глюкозы при разных мольных соотношениях серебра к щелочи. Ag:NaR = 1:3, 30°C, 72 (а) и 3 ч (б–г); Ag:NaOH = 1:0.1 (а), 1:2 (б), 1:4 (в), 1:8 (г).

мы. При дальнейшем повышении температуры до 60–100°C возрастают скорость реакции и выход продукта восстановления, однако доля пластин в нем уменьшается. При 130°C доля треугольных и гексагональных нанопластин резко уменьшается, и продукт восстановления состоит в основном из неправильных многогранников размером от 200 до 600 нм. При 150°C он представляет собой бесформенные сильно агрегированные частицы серебра.

Поскольку активность полиолов и спиртов в щелочных средах увеличивается [19], нами исследовано влияние щелочного реагента (гидроксида натрия) на размер и морфологию наночастиц серебра, полученных в условиях полиольного синтеза. В присутствии NaOH скорость восстановления ионов серебра существенно возрастает, что позво-

ляет получать наночастицы серебра при комнатной температуре. При 30°C через 72 ч образуется смесь, состоящая на 27% из нанопластин серебра размером около 170 нм и толщиной 30 нм, и на 73% из полиэдров (рис. 1а). При мольных отношениях NaOH к Ag 2:1 и 4:1 образуются наночастицы серебра размером 20–30 и 10–20 нм соответственно (рис. 1б–в), а при мольном отношении NaOH к Ag 8:1 в результате сильной агрегации образуются наночастицы серебра размером 20–80 нм (рис. 1г). Таким образом, в присутствии NaOH скорость восстановления ионов серебра существенно возрастает, что позволяет проводить синтез при комнатной температуре, при этом размер образующихся частиц резко уменьшается.

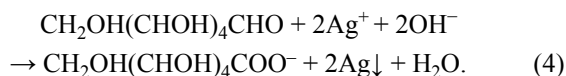
С целью увеличения выхода нанопластин серебра исследовано влияние дополнительного восстановителя – глюкозы на получение наночастиц серебра полиольным методом. Глюкоза может не только восстанавливать ионы серебра (3), но и действовать как стабилизатор образующихся атомов серебра. При восстановлении часть глюкозы окисляется до глюконовой кислоты, которая может создавать стабилизирующее покрытие на поверхности наночастиц [20].



Выход нанопластин серебра в условиях полиольного синтеза при комнатной температуре значительно возрастает в присутствии глюкозы. При мольном соотношении  $\text{Ag}^+:\text{NaR}:\text{Glu} = 1:3:2$  при  $30^\circ\text{C}$  и времени синтеза 72 ч пластины получены с выходом 57%, с размером и толщиной 240 и 40 нм соответственно (рис. 2а). В аналогичных условиях при мольном соотношении  $\text{Ag}^+:\text{Glu} = 1:1$  продукт восстановления состоит на 40% из пластин длиной около 170 нм и толщиной около 25 нм, и на 60% – из полиэдров. Таким образом, уменьшение доли глюкозы в системе практически не влияет на выход нанопластин, но уменьшает их длину и толщину. При мольном отношении глюкозы к серебру 1:4 в тех же условиях продукт восстановления состоит на 60% из пластин длиной около 130 нм и толщиной около 40 нм, и на 40% из полиэдров (рис. 2б), тогда как при дальнейшем увеличении количества глюкозы ( $\text{Ag}^+:\text{Glu} = 1:6$ ) длина пластин увеличивается до 200 нм, их толщина уменьшается до 30 нм (рис. 2в), а доля пластин в продукте восстановления составляет 50%.

По мере увеличения рН величина окислительно-восстановительного потенциала глюкозы смещается в сторону более низких значений, т. е. ее способность отдавать электроны в этих условиях усиливается [21, 22]. Такая зависимость потенциала окисления глюкозы от рН связана с тем, что щелочная среда облегчает раскрытие пиранозного цикла в результате отщепления  $\alpha$ -протона и тем самым ускоряет образование ионов глюконата и восстановление ионов серебра до атомов серебра [23, 24]. В связи с этим нами исследовано влияние щелочи на восстановление ионов серебра в

этиленгликоле в присутствии глюкозы. В присутствии  $\text{NaOH}$  реакция восстановления протекает по уравнению (4) [25].

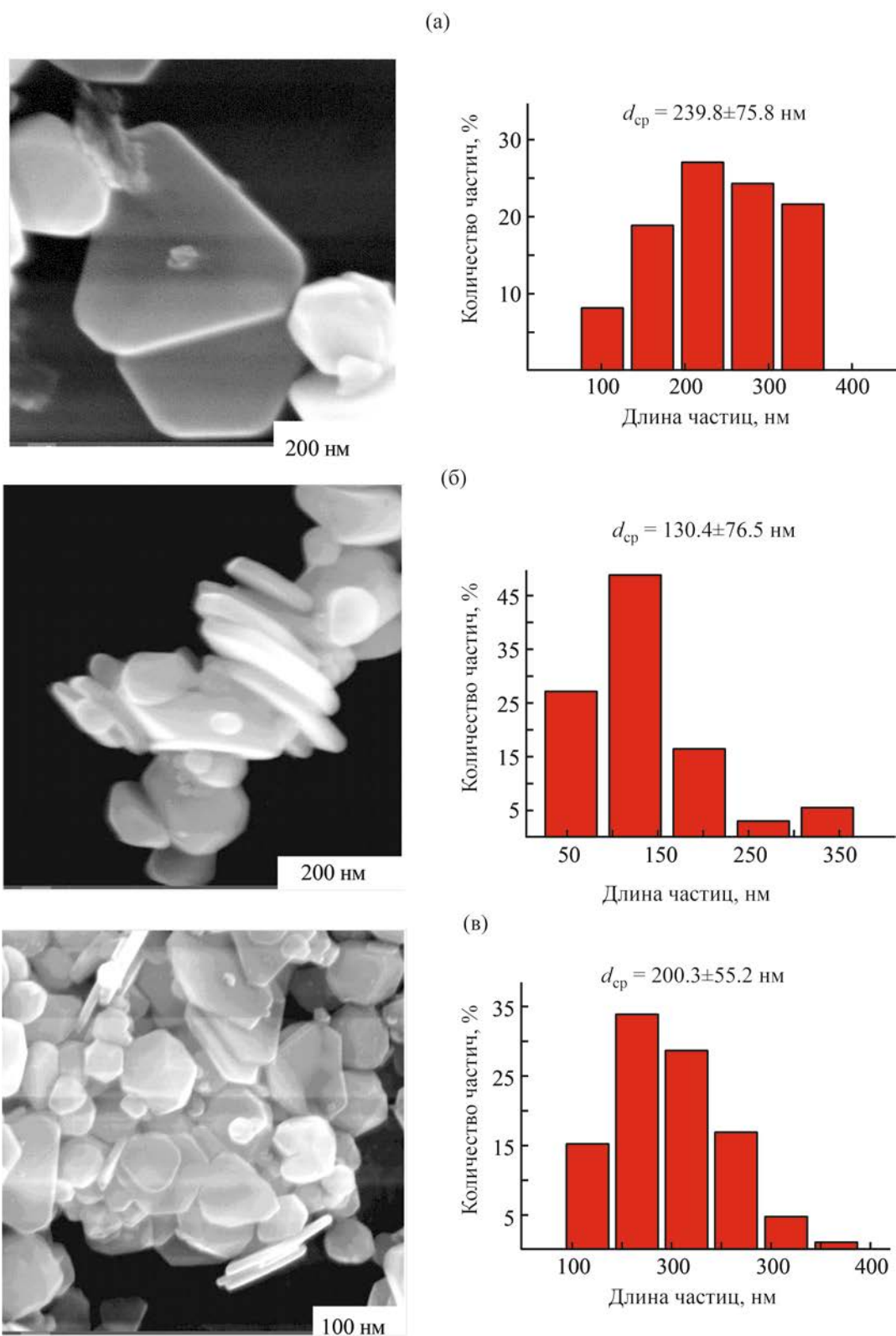


При мольном отношении  $\text{Ag}:\text{NaOH} = 1:0.1$ , при соотношении  $\text{Ag}^+:\text{NaR}:\text{Glu} = 1:3:2$  при  $30^\circ\text{C}$  и продолжительности реакции 72 ч удается увеличить выход пластин до 70%. Их длина составляет 160 нм, а толщина уменьшается до 25 нм (рис. 3а). Таким образом, выход нанопластин серебра в условиях полиольного синтеза существенным образом возрастает при введении в исходную реакционную массу небольших количеств  $\text{NaOH}$ , в то время как доля пластин в продукте восстановления с увеличением концентрации глюкозы в системе практически не изменяется и составляет около 60%.

При исследовании влияния температуры на морфологию частиц серебра, образующихся в присутствии глюкозы найдено, что увеличение температуры до  $40^\circ\text{C}$  приводит к утолщению пластин серебра (рис. 3б). При мольном соотношении  $\text{Ag}^+:\text{NaR}:\text{Glu} = 1:3:2$  образуется металлическое серебро в форме довольно однородных призм с размером ребра около 150 нм, толщиной около 70 нм и с выходом около 90%. В аналогичных условиях при уменьшении мольного отношения  $\text{Ag}^+:\text{Glu}$  до 1:1 продукт восстановления состоит на 64% из пластин длиной около 140 нм и толщиной около 35 нм. Таким образом, при увеличении температуры синтеза толщина пластин возрастает, а их длина уменьшается, т. е. происходит преобразование пластин в призмы.

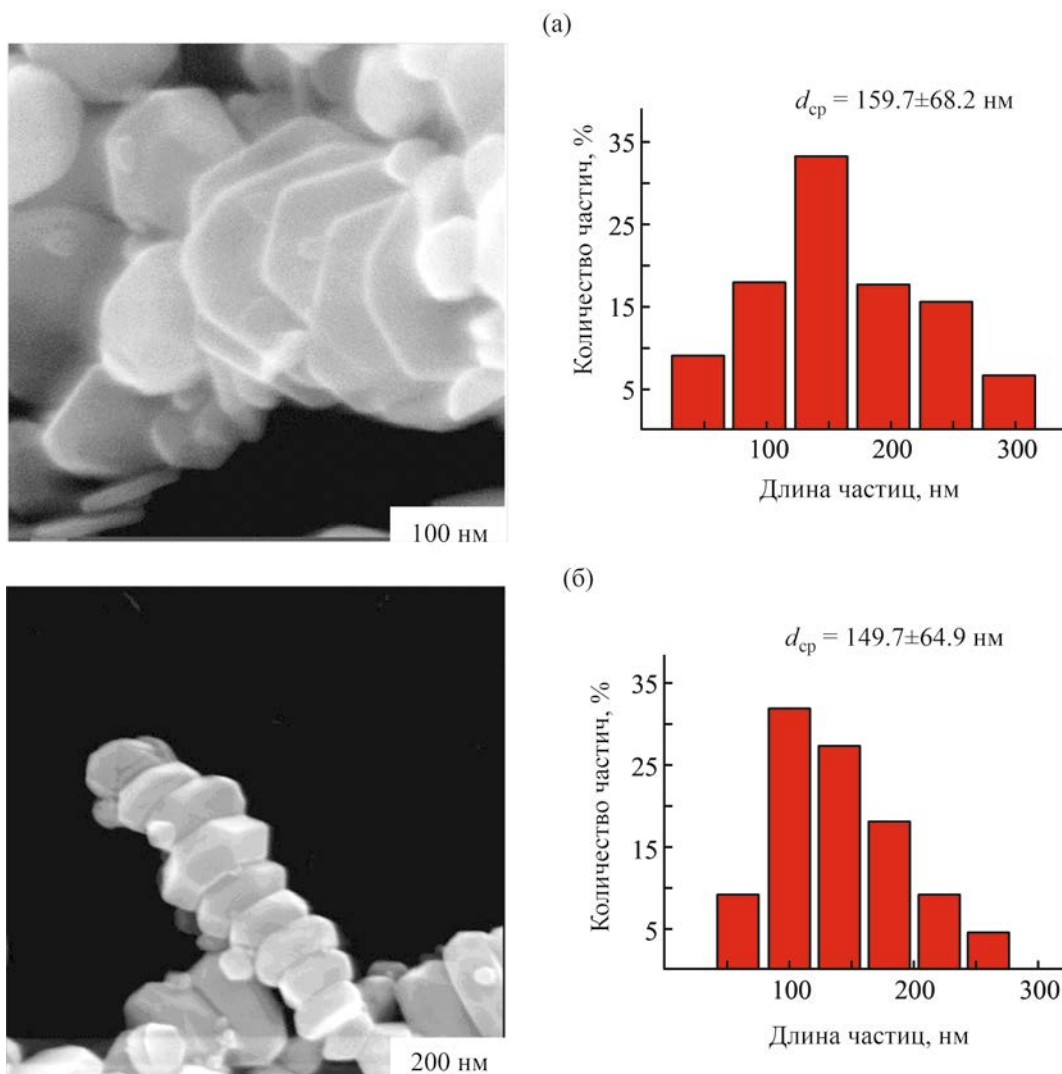
Согласно данным РФА (рис. 4), конечный продукт восстановления в этих условиях – металлическое серебро, о чем свидетельствуют характерные дифракционные максимумы при  $2\theta$   $38.08$ ,  $44.26^\circ$  и  $64.36$ ,  $77.52$  и  $81.40^\circ$ , соответствующие дифракции от плоскостей (111), (200), (220) (311) и (222) гранцентрированной кубической структуры серебра (JCPDS, карта № 01-071-4613).

Таким образом, использование натриевой соли 2-[2-(2-метоксиэтоксиг)этоксиг]уксусной кислоты **1** в условиях полиольного синтеза способствует формированию треугольных и шестиугольных нанопластин серебра. На анизотропный рост нано-



**Рис. 2.** Микрофотографии наночастиц серебра, полученных в присутствии глюкозы. Ag:NaR = 1:3, 30°C, 72 ч; Ag:Glu = 1:2 (а), 1:4 (б), 1:6 (в).

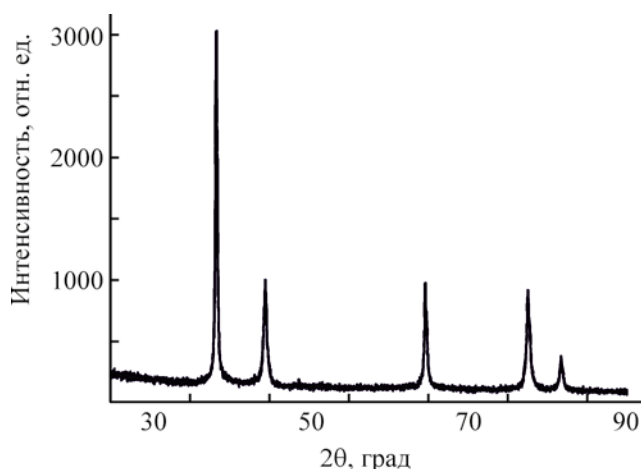




**Рис. 3.** Влияние pH и температуры на размер нанопластин серебра. Ag:NaR:Glu = 1:3:2, 30 (а) и 40°C (б), 72 ч; Ag:NaOH = 1:0.1 (а) и 1:0 (б).

частиц серебра оказывают влияние такие факторы как температура, концентрации соли кислоты **1** и NaOH. Анизотропный рост частиц наблюдается только в присутствии натриевой соли кислоты **1**. В ее отсутствие образуются крупные полиэдры размером 200–800 нм. Присутствие в системе глюкозы и NaOH позволяет снизить температуру восстановления, увеличить выход нанопластин до 70% и уменьшить их толщину до 25 нм. Благодаря геометрической анизотропии частицы в форме пластин можно использовать не только в составах

чернил и паст для 2D- и 3D-печати, но и в качестве материала для сенсоров и диагностики, поскольку они обладают уникальным спектром плазмонного резонанса. Предлагаемый нами сравнительно простой и дешевый способ позволяет получать нанопластины серебра без использования сложных многокомпонентных смесей, таких как поли(винилпирролидон), перекись водорода и цитрат натрия, а также темплат или предварительно синтезированных зародышей для стимулирования анизотропного роста частиц.



**Рис. 4.** Рентгенограмма порошков, полученных в результате восстановления нитрата серебра этиленгликолем в присутствии натриевой формы кислоты **1** и глюкозы. Ag:NaR:Glu = 1:3:2, 30°C, 72 ч, Ag:NaOH = 1:0.1.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали нитрат серебра (99.9%, ГОСТ 1277-75, СоюзХимПром, Россия), натрий гидроксид квалификации ХЧ, 2-[2-(2-метоксиэтокси)этокси]уксусную кислоту ( $\geq 95\%$ , Sigma Aldrich, США), этиленгликоль квалификации ОСЧ (ГОСТ 10164-75, 99.8%), глюкозу (99.5%, ГОСТ 975-88, СоюзХимПром, Россия) и этиловый спирт (95%, Химмед, Россия).

**Восстановление серебра(I).** Необходимую aliquоту кислоты **1** растворяли в 25 мл этиленгликоля, добавляли при перемешивании стехиометрическое количество гидроксида натрия. Отдельно растворяли навеску нитрата серебра в этиленгликоле и при постоянном перемешивании добавляли полученный раствор к раствору натриевой соли кислоты **1** в этиленгликоле. Полученную смесь перемешивали 5 мин, затем нагревали до необходимой температуры и добавляли раствор глюкозы в этиленгликоле. По окончании синтеза полученный осадок промывали 3 раза этанолом и сушили на воздухе при комнатной температуре. Размер частиц и их морфологию исследовали методами просвечивающей (ПЭМ), растровой (РЭМ) электронной микроскопии и рентгенофазового анализа (РФА).

Рентгенофазовый анализ осадков проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение, скорость вращения счетчика 0.1 град/мин).

Идентификацию фаз проводили с использованием базы порошковых дифракционных данных (PDF) (картотека ICDD, PDF-2, Release 2011). Исследование образцов методом сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения (СЭМ) проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan (Чехия), исследование методом просвечивающей электронной микроскопии – на электронном микроскопе JEM-2010 (JEOL, Япония, ускоряющее напряжение 200 кВ, разрешение – 0.14 нм).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисенко Татьяна Андреевна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0341-8755>

Логутенко Ольга Алексеевна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1523-5446>

Титков Александр Игоревич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0835-9985>

#### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН (проект № 0237-2019-0002).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kamyshny A., Magdassi S.* // Chem. Soc. Rev. 2019. Vol. 48. P. 1712. doi 10.1039/c8cs00738a
2. *Espera A.H. Jr., Dizon J.R.C., Chen Q., Advincula R.C.* // Prog. Addit. Manuf. 2019. Vol. 4. N 3. P. 245. doi 10.1007/s40964-019-00077-7
3. *Titkov A.I., Bulina N.V., Ulihin A.S., Shundrina I.K., Karpova E.V., Gerasimov E.Yu., Yukhin Yu.M., Lyakhov N.Z.* // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2017. Vol. 28. N 2. P. 2029. doi 10.1007/s10854-016-5762-0
4. *Titkov A.I., Shundrina I.K., Gadirov R.M., Odod A.V., Kurtsevich A.E., Yukhin Yu.M., Lyakhov N.Z.* // Mater. Today: Proc. 2018. Vol. 5. N 8. Pt 2. P. 16042. doi 10.1016/j.matpr.2018.05.049
5. *Rao V.K.R., Abhinav V.K., Karthik P.S., Singh S.P.* // RSC Adv. 2015. Vol. 5. 77760. doi 10.1039/C5RA08205F
6. *Ren H.M., Guo Y., Huang S.Y., Zhang K., Yuen M.M.F., Fu X.Z., Yu S., Sun R., Wong C.P.* // ACS Appl.



- Mater. Interfaces 2015. Vol. 7. P. 13685. doi 10.1021/acsami.5b03571
7. Lee Y.I., Kim S., Jung S.B., Myung N.V., Choa Y.H. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2013. V. 5. N 13. P. 5908. doi 10.1021/am401757y
  8. Xue C., Mirkin C.A. // Chem. Int. Ed. 2007. Vol. 46. P. 2036. doi 10.1002/anie.200604637
  9. Tang Z., Zhang Q., Yin Y., Chang C.A. // J. Phys. Chem. (C). 2014. Vol. 118. P. 21589. doi 10.1021/jp503319s
  10. Zhang Q., Li N., Goebel J., Lu Z., Yin Y. // J. Am. Chem. Soc. 2011. Vol. 133. P. 18931. doi 10.1021/ja2080345
  11. You T., Sun S., Song X., Xu S. // Cryst. Res. Technol. 2009. Vol. 44. N 8. P. 857. doi 10.1002/crat.200900332
  12. Xiong Y., Siekkinen A.R., Wang J., Yin Y., Kim M.J., Xia Y. // J. Mater. Chem. 2007. Vol. 17. P. 2600. doi 10.1039/b705253g
  13. Титков А.И., Логутенко О.А., Воробьев А.М., Герасимов Е.Ю., Булина Н.В., Юхин Ю.М., Ляхов Н.З. // ЖОХ. 2019. Т. 89. Вып. 1. С. 113; Titkov A.I., Logutenko O.A., Vorob'yov A.M., Gerasimov E.Yu., Bulina N.V., Yukhin Yu.M., Lyakhov N.Z. // Russ. J. Gen. Chem. 2019. Vol. 89. N 1. P. 100. doi 10.1134/S1070363219010183
  14. Titkov A.I., Logutenko O.A., Gerasimov E.Yu., Shundrina I.K., Karpova E.V., Lyakhov N.Z. // J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem. 2019. Vol. 94. N 3–4. P. 287. doi 10.1007/s10847-019-00921-x
  15. Титков А.И., Борисенко Т.А., Логутенко О.А. // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. С. 66. doi 10.15372/KhUR2020204
  16. Fievert F., Lagier J.P., Figlarz M. // MRS Bull. 1989. Vol. 14. N 12. P. 29. doi 10.1557/S0883769400060930
  17. Sun Y., Xia Y. // Science. 2002. Vol. 298. P. 2176. doi 10.1126/science.1077229
  18. Титков А.И., Герасимов Е.Ю., Шашков М.В., Логутенко О.А., Булина Н.В., Юхин Ю.М., Ляхов Н.З. // Коллоид. ж. 2016. Т. 78. № 4. С. 515; Titkov A.I., Gerasimov E.Yu., Shashkov M.V., Logutenko O.A., Bulina N.V., Yukhin Yu.M., Lyakhov N.Z. // Colloid J. 2016. Vol. 78. N 4. P. 515. doi 10.1134/S1061933X16040189
  19. Gomes J.F., Garcia A.C., Ferreira E.B., Pires C., Oliveira V.L., Tremiliosi-Filho G., Gasparotto Luiz H.S. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2015. Vol. 17. P. 21683. doi 10.1039/C5CP02155C
  20. Giersig M., Ung T., Liz-Marzan L.M., Mulvaney P. // 1997. Adv. Mater. Vol. 9. N 7. P. 570. doi 10.1002/adma.19970090712
  21. Shenoy U.S., Shetty A.N. // Appl. Nanosci. 2014. Vol. 4. P. 47. doi 10.1007/s13204-012-0169-6
  22. Pasta M., Ruffo R., Falletta E., Mari C.M., Pina C.D. // Gold Bull. 2010. Vol. 43. N. 1. P. 57. doi 10.1007/BF03214967
  23. Raveendran P., Fu J., Wallen S.L. // Green Chem. 2006. Vol. 8. P. 34. doi 10.1039/B512540E
  24. Philip D. // Spectrochim. Acta (A). 2010. Vol. 75. P. 1078. doi 10.1016/j.saa.2009.12.058
  25. Wang H., Qiao X., Chen J., Ding S. // Colloids Surf. (A). 2005. Vol. 256. N 2–3. P. 111. doi 10.1016/j.colsurfa.2004.12.058

## Synthesis of Silver Nanoplates by Polyol Method in the Presence of Ethoxy-Substituted Carboxylic Acid and Glucose

T. A. Borisenko<sup>a</sup>, O. A. Logutenko<sup>a,\*</sup>, and A. I. Titkov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630128 Russia

\*e-mail: ologutenko@solid.nsc.ru

Received March 23, 2022; revised April 20, 2022; accepted April 21, 2022

Triangular and hexagonal silver nanoplates were obtained by reduction of silver(I) nitrate in ethylene glycol in the presence of 2-[2-(2-methoxyethoxy)ethoxy]acetic acid sodium salt and glucose. The resulting particles were characterized by X-ray phase analysis and electron microscopy. The presence of glucose and NaOH in the reaction mixture makes it possible to lower the synthesis temperature to 30°C, increase the yield of nanoplates to 70%, and reduce their thickness to 25 nm.

**Keywords:** silver, nanoplates, 2-[2-(2-methoxyethoxy)ethoxy]acetic acid, glucose, ethylene glycol, reduction