

## БИООРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 577.1:543.422.27  
DOI 10.26456/vtchem2025.4.16

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ САМООРГАНИЗАЦИИ В НИЗКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ L-ЦИСТЕИНА И ЦИТРАТА СЕРЕБРА С ДОБАВЛЕНИЕМ ЛИМОННОЙ КИСЛОТЫ

М.А. Аверкина<sup>1</sup>, Д.В. Аверкин<sup>1</sup>, Д.В. Вишневецкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-

технических и радиотехнических измерений», пгт. Менделеево

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь

В данной работе исследовано влияние лимонной кислоты на процессы самоорганизации в водных растворах, содержащих L-цистеин и цитрат серебра (ЦСРлим-системы). Методами вискозиметрии, УФ-видимой и ИК-Фурье спектроскопии, а также динамического светорассеяния показано, что введение лимонной кислоты ускоряет самоорганизацию и приводит к формированию наночастиц и супрамолекулярных комплексов типа  $\text{Ag}^0/\text{Ag}^+/\text{Цис}$ . Установлено, что ключевую роль в механизме самоорганизации играет степень диссоциации цитрата серебра и концентрация цитрат-анионов. Установлено, что в таких системах образуется золь наночастиц серебра с размерами частиц от 15 до 50 нм, значение дзета-потенциала составляет порядка 75 мВ. Показано, что увеличение содержания цитрат-анионов путем внесения раствора лимонной кислоты в момент смешения систем способствует росту гидродинамического диаметра частиц (до 80–170 нм) и постепенному образованию микроразмерных агрегатов вследствие ассоциации частиц, что подтверждается данными измерений дзета-потенциалу (5–35 мВ). Полученные результаты важны для понимания механизмов образованияnanoструктур на основе биомолекул и ионов металлов и могут быть использованы при разработке новых функциональных материалов.

**Ключевые слова:** L-цистеин, цитрат серебра, низкоконцентрированный водный раствор, самоорганизация, наночастицы серебра.

#### Введение

Разработка новых функциональных материалов методами «зеленой» химии, в частности, с использованием биосовместимых молекул, таких как аминокислоты, является одной из актуальных задач современной нанонауки [1,2]. Аминокислота L-цистеин, содержащая

тиольную, амино- и карбоксильную функциональные группы, представляет особый интерес как лиганд, способный к комплексообразованию с ионами серебра и формированию стабильных наноструктур [3]. Известно, что системы на основе цистеина и солей серебра (ЦСР-системы) способны к спонтанной самоорганизации с образованием супрамолекулярных полимеров и наночастиц серебра [4–9].

Одним из ключевых факторов, влияющих на кинетику и механизм самоорганизации в таких системах, является природа противоиона и кислотность среды. Цитрат-анион, являясь слабым лигандом и буферным агентом, может существенно модифицировать процесс формирования наночастиц. Однако систематическое изучение влияния избытка цитрат-анионов, вводимых в виде лимонной кислоты, на структурные и кинетические особенности формирования ЦСР-систем остается недостаточно изученным.

Цель данной работы – исследовать влияние молярного соотношения L-цистеина и цитрата серебра, а также добавления лимонной кислоты на процессы самоорганизации, структуру и стабильность формирующихся наночастиц и супрамолекулярных комплексов.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- синтезировать ЦСР-системы с различным молярным соотношением цистеин/цитрат-анион (1:1 и 1:1,25) с добавлением лимонной кислоты;
- изучить кинетику процессов самоорганизации методом вискозиметрии;
- исследовать кислотность ( $\text{pH}$ ) систем в процессе созревания;
- методами УФ-видимой и ИК-Фурье спектроскопии охарактеризовать образующиеся комплексы и наночастицы;
- определить размеры частиц и их дзета-потенциал методами динамического и электрофоретического светорассеяния.

### Экспериментальная часть

В работе использованы реагенты: L-цистеин 99 %, цитрат серебра 99,8 % (“Acros”).

Все растворы готовили на бидистиллированной воде со значением электропроводности не менее 10 МОм·см. Для этого воду, полученную после дистилляции и деионизации на установке Millipore, дополнитель но фильтровали на 0,2  $\mu\text{M}$  фильтрах. Для приготовления цистеин-серебряного раствора (далее – ЦСРцит) использовалась следующая методика: готовился раствор L-цистеина в концентрации 10 мМ. Далее в пустой сосуд сначала наливали необходимое количество воды, далее добавляли раствор L-цистеина и вносили навеску цитрата

серебра в молярном соотношении «аминокислота/цитрат-анион» – 1 к 1 и 1 к 1,25. Полученные растворы оставляли в темном сухом месте до полного созревания. В конечном итоге получали растворы систем с концентрацией 3 мМ по аминокислоте на основе L-цистеина с цитратом серебра. Для получения подкисленных систем (далее – ЦСРлим) вносили лимонную кислоту в момент смешения цистеин-серебряного раствора путем добавления 100 мкл 1 Н раствора лимонной кислоты на 2 мл системы.

Измерение размеров агрегатов в исследуемых растворах проводили методом динамического светорассеяния (ДРС) с использованием анализатора Zetasizer “Nano ZS” (фирма “Malvern”) с Не-Не-лазером (633 нм) мощностью 4 мВт. Все измерения осуществлялись при температуре 25 °С в конфигурации прямого рассеяния (13°) в U-образных капиллярных кюветах с применением стальных контактных пластин, обеспечивающих лучшее термостатирование образца и исключающих множественное рассеяние с поверхности кюветы и ребер капилляра. Математическая обработка результатов полученных кросскорреляционных функций флуктуаций интенсивности рассеянного света проводилась в программе Zetasizer Software, где решение полученного уравнения зависимости от коэффициента диффузии производилось методом кумулянтов. Результатом решения являлась функция z(D). Гидродинамические радиусы рассеивающих частиц рассчитывались из коэффициентов диффузии по формуле Стокса-Эйнштейна (1):

$$D = \frac{k \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии; k – константа Больцмана; T – абсолютная температура; η – вязкость среды; R – радиус рассеивающих частиц.

Для вычисления связи электрофоретической подвижности частиц с дзета-потенциалом в вычислительном аппарате анализатора Zetasizer «Nano ZS» (фирма «Malvern») является теория Смолуховского, выраженная уравнением (2):

$$\zeta = \frac{\mu \cdot \eta}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}, \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; μ – электро-форетическая подвижность; ε<sub>0</sub> – электрическая постоянная; η – динамическая вязкость; ζ – дзета-потенциал,

Измерение дзета-потенциала частиц в образцах проведено в U-образных капиллярных кюветах Malvern DTS 1070.

Вязкость образцов измеряли на вибрационном вискозиметре SV-10 (фирма «A&D Company», Япония), в котором вибрация сенсорных пластин осуществлялась с частотой 30 Гц и постоянной амплитудой около 1 мм. Измерение вязкости растворов осуществляли при комнатной температуре. Величину pH растворов измеряли, используя pH-метр “Seven Multi S70” фирмы Mettler Toledo.

Измерения электронных спектров производились на спектрофотометре СФ-56 (ОКБ «Спектр») в режиме сканирования относительного пропускания T, % в образцах. Шаг дискретизации составлял 1 нм, время измерения – 0,2 сек. Ширина щели составляла 1 нм. Измерения проводились в кварцевых кюветах с длиной оптического пути, равной 1 мм. Измерения спектров пропускания в ИК-диапазоне производились на спектрофотометре ФСМ-2002.

## Результаты и обсуждение

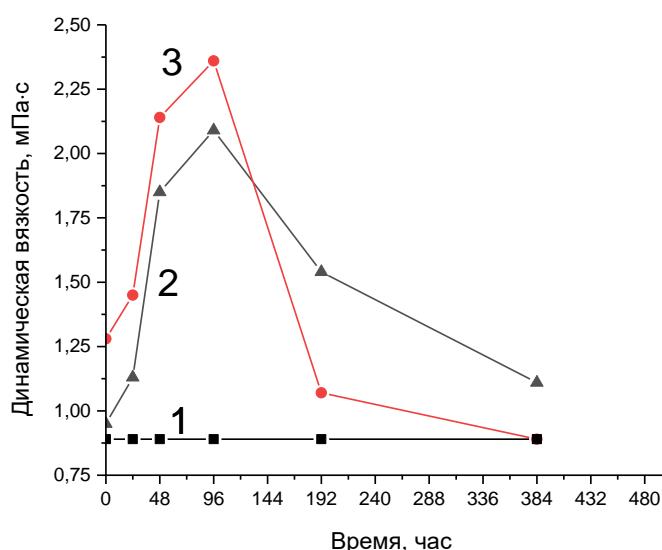


Рис. 1. Кривые динамической вязкости образцов. 1 – вода; 2 – ЦСРлим с молярным соотношением 1 к 1 по аминокислоте; 3 – ЦСРлим с молярным соотношением 1 к 1,25 по аминокислоте.

Время измерений – 15 минут, температура измерений – 23 °C.

Количество лимонной кислоты в системе – 0,05 сM.

Для определения кинетики процессов самоорганизации в исследуемых системах были проведены измерения динамической вязкости с момента смешения систем. Установлено, что, в отличие от обычных

систем ЦСРцит [8], системы ЦСРлим, полученные путем дополнительного введения лимонной кислоты в процесс смешения, обладают меньшим временем созревания, о чем говорит большее значение вязкости, особенно для систем с молярным соотношением 1 к 1,25 – динамическая вязкость составляет 1,3 мПа·с уже в момент смешения, однако, при количестве лимонной кислоты 0,05 сМ и более, системы склонны к образованию коричневого осадка. Таким образом, полученные данные подтверждают наличие самоорганизации в системах и указывают на возможное образование сложных систем вида  $\text{Ag}^0/\text{Ag}^+/\text{Цис}$  в результате более полной диссоциации цитрата серебра в момент смешения систем [8–10]. На то, что механизм самоорганизации отличается от механизма в системах ЦСРцит, указывает то, что pH систем ЦСРлим увеличивается с течением времени, если спустя первые сутки численные значения pH сопоставимы с системами ЦСРцит (таблица 1) – значения pH от 1,6 до 1,8 для ЦСРлим и от 1,8 до 2,1 для ЦСРцит, то спустя равный отрезок времени (более 96 часов) значения pH в системах ЦСРлим становятся численно равны 3, в то время как pH систем ЦСРцит составляет 1,6. Таким образом, результаты экспериментов не опровергают гипотезу, что самоорганизация в таких системах происходит за счет избытка общего числа катионов  $\text{Ag}^+$  в системе и нахождения аминокислоты в катионной форме. Уменьшение pH и образование взвеси косвенно подтверждает, что первым этапом самоорганизации системы является образование комплексов  $\text{Ag}^+/\text{Цис}$  и реакция соли с аминокислотой, далее образовавшиеся комплексы реагируют между собой, используя катионы серебра как элемент ионных мостиков.

Таблица 1  
Значения pH систем ЦСРцит и ЦСРлим

Система	pH, 24 ч	pH, 96 ч	pH, 200 ч
ЦСРцит 1 к 1	1,92	1,59	1,61
ЦСРцит 1 к 1,25	1,71	1,67	1,66
ЦСРлим 1 к 1	1,84	1,73	2,87
ЦСРлим 1 к 1,25	1,65	1,61	2,69

Следующим этапом исследования систем являлась регистрация электронных спектров систем ЦСРлим. Для проверки гипотезы также был исследован L-цистеин в катионной форме (растворенный в 1 Н растворе лимонной кислоты) в качестве референтного образца.

На спектрах, представленных на рис. 2, приведены электронные спектры систем ЦСРлим, также проводилось исследование образцов в разные моменты времени. Согласно полученным электронным спектрам

установлено, что обеим системам характерен выраженный пик 280 нм (рис. 2 а и б), связанный с активностью карбоксильных групп. В обеих системах присутствует пик 365 нм (рис. 2), который, предположительно, указывает на наличие плазмонного резонанса от наночастиц серебра в системе с учетом гипсохромного сдвига [8–11].

А

Б

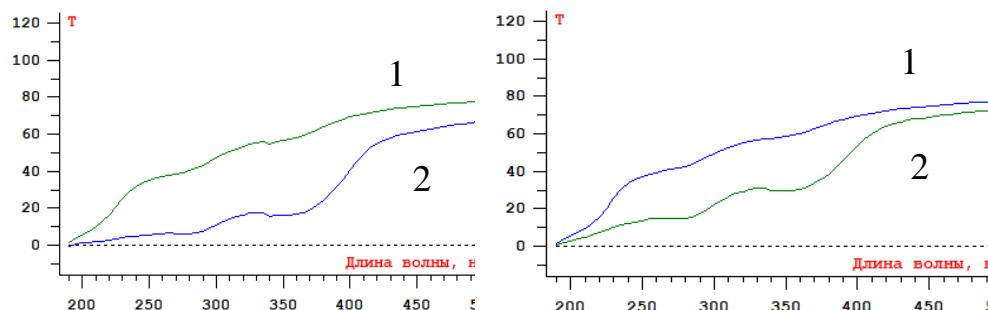


Рис. 2. Электронные спектры пропускания в УФ-видимом диапазоне систем ЦСРлим: А – ЦСРлим с молярным соотношением 1 к 1 по аминокислоте; Б – ЦСРлим с молярным соотношением 1 к 1,25 по аминокислоте; 1 – время самоорганизации 24 часа; 2 – время самоорганизации 96 часов. Концентрация аминокислоты – 3 мМ. Концентрация лимонной кислоты в системе – 0,05 сМ.

В системах ЦСРлим (рис.2) не наблюдается характерных пиков активности аминогруппы 310 нм и поглощения менее 250 нм. Исходя из полученных результатов можно утверждать, что в системах образуются наночастицы и наблюдается активность связывающих их карбоксильных групп, т.е. можно предположить наличие комплексов вида  $\text{Ag}^0/\text{Ag}^+/\text{Цис}$ , однако по полученным УФ-спектрам не вполне ясно, присутствует ли в системах связь  $-\text{S}-\text{Ag}-$ , характерная для супрамолекулярных цепочек в подобных системах, или же на УФ-спектрах наблюдается картина смещения и наложения хромофорных групп ввиду образования сложных комплексов. Однако полученные данные по системам с добавлением лимонной кислоты не противоречат гипотезе, что самоорганизация происходит путем образования комплексов  $\text{Ag}^+/\text{Цис}$  в кислой среде при восстановлении наночастиц серебра.

В ИК-спектрах у систем ЦСРцит и ЦСРлим наблюдаются отличия от системы ЦСРацет в области  $2300\text{--}2400 \text{ см}^{-1}$  и  $700\text{--}900 \text{ см}^{-1}$  [10]. Колебания на длине волны  $2300\text{--}2400 \text{ см}^{-1}$  скорее всего относятся к колебаниям диоксида углерода как примеси из атмосферы. Также отсутствие полосы поглощения валентных колебаний SH-группы с максимумом  $\sim 2551 \text{ см}^{-1}$  говорит о том, что не происходит разрушения

связей -Ag-S. Положение карбоксильной группы в образцах систем предполагает их участие в меж- и внутримолекулярном взаимодействии, вероятно за счет водородного связывания, поскольку в спектрах систем полоса  $\nu(C=O)$ , амид I, находится на длине волны  $\sim 1626 \text{ см}^{-1}$ , а в спектре цистеина ей соответствует полоса поглощения с максимумом  $\sim 1650 \text{ см}^{-1}$  [8, 12]. Широкая полоса поглощения в области валентных колебаний на длине волны  $\sim 3104\text{--}2970 \text{ см}^{-1}$  соответствует  $\nu(NH^{3+})$ , а поглощение на длине волны  $\sim 1569 \text{ см}^{-1}$  характеризует  $\delta(NH^{3+})$ . Разная форма этих полос в спектрах свидетельствует о различной степени вовлеченности этих групп в межмолекулярное связывание, подтверждая нековалентный характер взаимодействия с супрамолекулярной цепочкой.

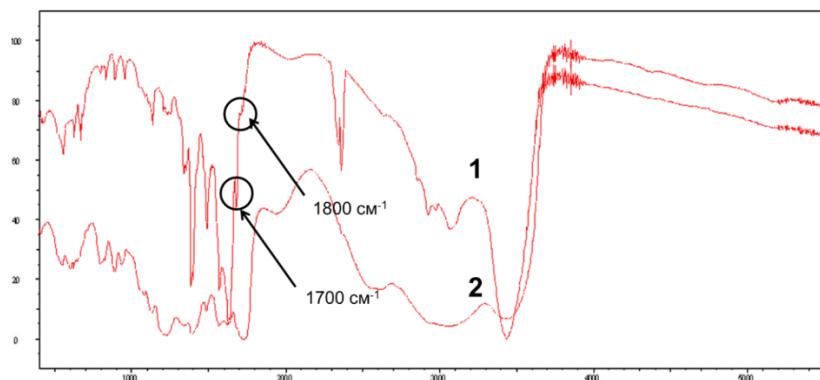


Рис. 3. ИК-Фурье спектры пропускания: 1 – ЦСРцит с молярным соотношением 1 к 1,25 по аминокислоте; 2 – ЦСРлим с молярным соотношением 1 к 1,25 по аминокислоте.

Концентрация аминокислоты – 3 мМ,  
концентрация лимонной кислоты – 0,05 сМ.

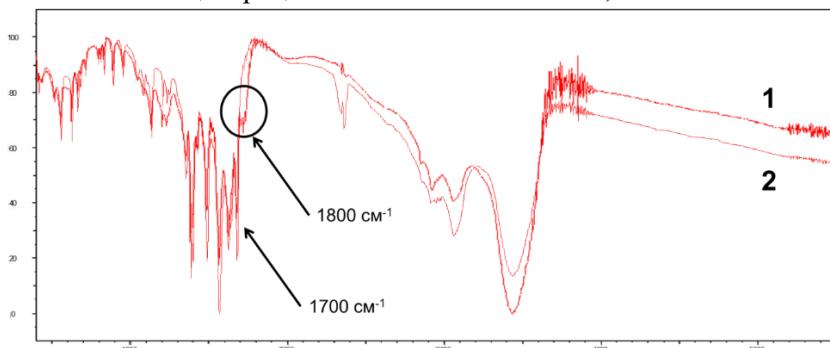


Рис. 4. ИК-Фурье спектры пропускания: 1 – ЦСРцит с молярным соотношением 1 к 1 по аминокислоте; 2 – ЦСРлим с молярным соотношением 1 к 1 по аминокислоте. Концентрация по аминокислоте 3 мМ. Концентрация аминокислоты – 3 мМ, концентрация лимонной кислоты – 0,05 сМ.

Размеры частиц и дзета-потенциал систем были исследованы методами динамического и электрофоретического рассеяния света. В системе ЦСРцит с соотношением 1 к 1 диаметр частиц составляет порядка 50 нм (рис. 5.1), в системе с соотношением 1 к 1,25 – 10–15 нм (рис. 5.2). Дзета-потенциал составляет 80 и 70 мВ соответственно. Установлено, что первые 96 часов размер частиц в системах ЦСРлим не превышает 200 нм в диаметре. В дальнейшем происходит образование крупных частиц и выпадение осадка.

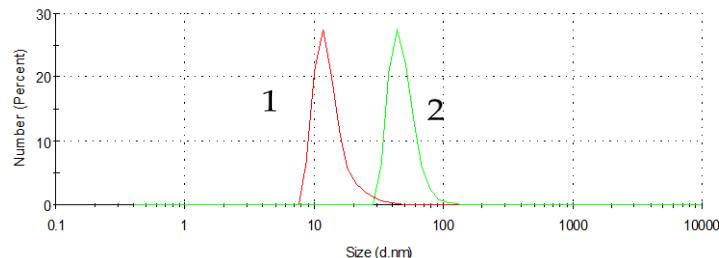


Рис. 5. Распределение частиц по размерам в системах ЦСРцит:  
1 – ЦСРцит с молярным соотношением 1 к 1 по аминокислоте; 2 – ЦСРцит с молярным соотношением 1 к 1,25 по аминокислоте.  
Концентрация аминокислоты – 3 мМ.

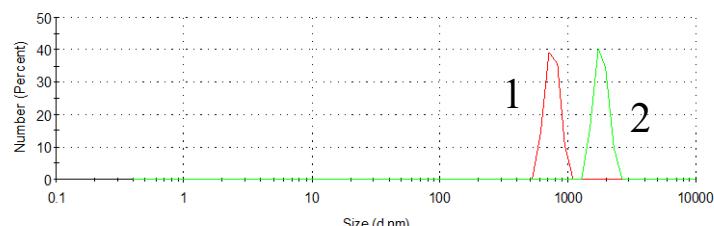


Рис. 6. Распределение частиц по размерам в системах ЦСРлим: 1 – ЦСРлим с молярным соотношением 1 к 1 по аминокислоте; 2 – ЦСРлим с молярным соотношением 1 к 1,25 по аминокислоте.  
Концентрация аминокислоты – 3 мМ.  
Концентрация лимонной кислоты – 0,025 сМ.

При исследовании осадков, образовавшихся в системах, установлено, что осадок состоит из частиц размерами от 0,7 до 2 мкм (рис. 6), причем в системе с соотношением 1 к 1 по аминокислоте с концентрацией лимонной кислоты 0,025 сМ значение дзета-потенциала составляет 35 мВ, что позволяет отнести эту систему к условно

стабильной, несмотря на наличие осадка. Прочие системы обладают значениями дзета-потенциала от 5 до 20 мВ.

Исходя из полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод, что ключевую роль в процессе самоорганизации исследуемых систем играет степень диссоциации цитрата серебра и количество цитрат-анионов. Небольшое количество лимонной кислоты (0,025 сМ) позволяет соли серебра лучше диссоциировать, что приводит к большему числу катионов серебра  $\text{Ag}^+$  в момент начала процесса самоорганизации в системах ЦСРлим по сравнению с системами ЦСРцит. Это приводит к большему числу связываний между собой комплексов  $\text{Ag}^+/\text{Цис}$ , а большее число цитрат-анионов приводит к увеличению диаметра этих частиц и дополнительной стабилизации двойного электрического слоя за счет достраивания адсорбционного слоя цитрат-анионами по схожему с оксолат-анионами механизму [8, 12], в отличие от подобных систем ЦСРацет, для которых характерна стабилизация двойного электрического слоя за счет связывания между собой нескольких наночастиц серебра [11, 13]. Это подтверждается тем, что по мере увеличения числа цитрат-анионов происходит дестабилизация наночастиц, разрушение линейных цепочек вида  $(-\text{Ag}-\text{S}(\text{Cys})-\text{Ag}-\text{S}(\text{Cys})-)_n$ , образование связанных между собой наночастиц и сложных комплексов серебра и образование микроразмерных агрегатов.

### **Заключение**

Проведенное комплексное исследование позволило установить существенное влияние лимонной кислоты на процессы самоорганизации в системах L-цистеин – цитрат серебра.

1. Показано, что введение лимонной кислоты в ЦСР-системы приводит к ускорению процессов самоорганизации, что подтверждается данными вискозиметрии. Наблюданное увеличение значения рН систем ЦСРлим со временем (до 3,0 за 200 часов) в отличие от систем ЦСРцит (рН ~ 1,6), свидетельствует об ином механизме протекающих процессов.

2. Данные УФ-видимой спектроскопии указывают на образование наночастиц серебра (плазмонный резонанс на длине волны ~365 нм) и комплексов типа  $\text{Ag}^0/\text{Ag}^+/\text{Цис}$ . ИК-Фурье спектроскопия подтвердила вовлечение карбоксильных и аминогрупп цистеина в межмолекулярные взаимодействия и отсутствие свободных тиольных групп, что свидетельствует об образовании связей S-Ag.

3. Методами светорассеяния установлено, что в системах ЦСРлим в первые 96 часов формируются наночастицы с гидродинамическим диаметром 80–170 нм с последующим образованием микронных

агрегатов. Значения дзета-потенциала (5–35 мВ) характеризуют системы как условно стабильные.

4. Предложен механизм самоорганизации, согласно которому ключевую роль играет степень диссоциации цитрата серебра. Добавление лимонной кислоты увеличивает концентрацию катионов  $\text{Ag}^+$  в системе на начальном этапе, что способствует образованию большего числа комплексов  $\text{Ag}^+/\text{Цис}$  и их последующей агрегации. Увеличение концентрации цитрат-анионов приводит к стабилизации частиц и росту их размера за счет достройки адсорбционного слоя, а в избытке – к дестабилизации и образованию крупных агрегатов.

Таким образом, регулируя состав исходного раствора (соотношение реагентов и количество лимонной кислоты), можно целенаправленно управлять размером, стабильностью и архитектурой формирующихся нано- и микроструктур на основе цистеина и серебра, что открывает перспективы для их использования в качестве функциональных материалов для катализа, сенсорики и биомедицины.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют, что у них нет известных им конкурирующих интересов, которые могли бы повлиять на работу, представленную в настоящей статье.

### **Список литературы:**

1. Sana Suhail, Lakshmi S. Nair // Hydrogel-nanoparticle composites for drug delivery // Drug Delivery Nanosystems for Biomedical Applications. Elsevier. – 2018. – P. 229–254.
2. Zheng, Kaiyuan and Yuan, Xun and Goswami, Nirmal and Zhang, Qingbo and Xie, Jianping // Recent advances in the synthesis{,} characterization{,} and biomedical applications of ultrasmall thiolated silver nanoclusters. RSC Adv. – 2014. – V. 4. – P. 60581-60596.
3. Овчинников М.М., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. // Журн. структур. химии. 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 1203–1207.
4. Pablo Casuso, Pedro Carrasco, Iraida Loinaz, Hans J. Grande and Ibon Odriozola. // Organic & Biomolecular Chemistry. – 2010. – V. 8. – P. 5455–5458.
5. Saumya Prasad, Imon Mandal, Shubham Singh, Ashim Paul, Bhubaneswar Mandal, Ravindra Venkatramani, Rajaram Swaminathan. // Chemical Science. –2017. – V. 8. – P. 5219–5806.
6. Eduardo Lopez-Tobar, Belen Hernández, Mahmoud Ghomi, Santiago Sanchez-Cortes. // J. Phys. Chem. C – 2013. – V. 117. – P. 1531–1537.

7. Pablo Casuso, Pedro Carrasco, Iraida Loinaz, Hans J. Grande and Ibon Odriozola. // *Organic & Biomolecular Chemistry*. – 2010. – V. 8. – P. 5455–5458.
8. Аверкина М.А., Вишневецкий Д.В., Аверкин Д.В. Исследование процессов самоорганизации в низкоконцентрированных водных растворах L-цистеина и цитрата серебра // *Вестник Тверского Государственного Университета. Серия: химия*. – № 3 (57). – 2024. – С. 7–16. – DOI: 10.26456/vtchem2024.3.1
9. Vishnevetskii D.V. Behavior and bioactive properties of aqueous L-cysteine–AgNO<sub>3</sub> solution at different pH / Vishnevetskii D.V., Semenova E.M., Averkin D.V. и др. // *Mendeleev Communications*. – V. 33. – I. 3. – 2023. – P. 431–432.
10. Vishnevetskii D.V. L-cysteine and N-acetyl-L-cysteine mediated synthesis of nanosilver-based sols and hydrogels with antibacterial and antibiofilm properties / Vishnevetskii D.V., Averkin D.V., Efimov D. и др. // *J. Mater. Chem. B*. – 2023. – V. 11. – P. 5794–5804.
11. Vishnevetskii D. V. L-Cysteine/AgNO<sub>2</sub> low molecular weight gelators: self-assembly and suppression of MCF-7 breast cancer cells / Vishnevetskii D. V., Mekhtiev A. R., Perevozova T. V. и др. // *Soft Matter*. – 2020. – V. 16. – P. 9669–9673.
12. Аверкин Д. В. Исследование супрамолекулярных систем на основе низкоконцентрированных растворов L-цистеина и ацетата серебра при добавлении раствора щавелевой кислоты / Аверкин Д. В., Вишневецкий Д. В., Балаханов Д. М. и др. // *Вестник Тверского государственного университета. Серия . Серия «Химия»*. – 2023. – № 3. – С. 7–12.
13. Vishnevetskii D. V., Mekhtiev A. R., Perevozova T. V. L-Cysteine as a reducing/capping/gel-forming agent for the preparation of silver nanoparticle composites with anticancer properties / Vishnevetskii D. V., Mekhtiev A. R., Perevozova T. V. и др. // *Soft Matter*. – 2022. – V. 18. – I. 15. – P. 3031–3040.

*Об авторах:*

АВЕРКИНА Мария Алексеевна – техник 1-й категории лаборатории метрологического обеспечения измерений дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (141570, г. Солнечногорск, пгт. Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)); e-mail: maria.a.averkina@yandex.ru

ВИШНЕВЕЦКИЙ Дмитрий Викторович – кандидат химических наук, доцент кафедры физической химии Тверского государственного университета (170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35); e-mail: rickashet@yandex.ru

АВЕРКИН Дмитрий Вадимович – научный сотрудник лаборатории метрологического обеспечения измерений дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (141570, г. Солнечногорск, пгт. Менделеево (промзона ВНИИФТРИ)); e-mail: averkindmitry@gmail.com

**THE INVESTIGATION OF SELF-  
ORGANIZATION PROCESSES IN LOW-  
CONCENTRATION AQUEOUS SOLUTIONS OF L-  
CYSTEINE AND SILVER CITRATE**

**M.A. Averkina<sup>1</sup>, D.V. Averkin<sup>1</sup>, D.V. Vishnevetskii<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering,  
Mendeleev, Moscow region*  
<sup>2</sup>*Tver State University, Tver*

This work investigates the effect of citric acid on the self-organization processes in aqueous solutions containing L-cysteine and silver citrate. Using viscometry, UV-Vis and FTIR spectroscopy, and dynamic light scattering, it was shown that the introduction of citric acid accelerates self-organization and leads to the formation of nanoparticles and supramolecular complexes of the Ag<sup>0</sup>/Ag<sup>+</sup>/Cys type. It was established that the degree of dissociation of silver citrate and the concentration of citrate anions play a key role in the self-organization mechanism. An increase in the content of citrate anions was found to promote the growth of the hydrodynamic diameter of particles (up to 80–170 nm) and the formation of micron-sized aggregates, which is confirmed by zeta potential data (5–35 mV). The obtained results are important for understanding the mechanisms of nanostructure formation based on biomolecules and metal ions and can be used in the development of new functional materials.

**Keywords:** *L-cysteine, silver citrate, low-concentration aqueous solution, self-organization, silver nanoparticles.*

Дата поступления в редакцию: 10.11.2025.  
Дата принятия в печать: 14.11.2025.