

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 544.25.022.5+ 544.725+615.31

**СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫЕ АГРЕГАТЫ СЕРЕБРО-ХОЛЕСТЕРИН
И СЕРЕБРО-ТИОХОЛЕСТЕРИН: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
И ПЕРСПЕКТИВЫ БИМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

**Яна Андреевна Громова¹, Софья Андреевна Громова¹, Татьяна Игоревна
Шабатина^{1,2}**

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

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Автор, ответственный за переписку: Яна Андреевна Громова,
chemyaninka@mail.ru

Аннотация. Методом борогидридного восстановления получены наночастицы серебра (НЧС), стабилизированные мезогенными лигандами – холестерином (Ch) и тиохолестерином (TCh). В УФ-спектрах обоих образцов наблюдается интенсивная полоса плазмонного поглощения с максимумами при 430 и 470 нм соответственно, средний размер стабилизированных наночастиц серебра, по данным ПЭМ, составил $(5,5 \pm 1,0)$ нм и $(2,7 \pm 0,6)$ нм. Результаты ИК-спектроскопии подтверждают связывание поверхностных атомов серебра с функциональными группами холестериновых лигандов, что коррелирует с полученными ранее результатами квантово-химических расчетов модельных систем. Показано, что введение наночастиц серебра в матрицу холестериновых лигандов увеличивает температурный интервал существования жидкокристаллической мезофазы. Серебро присутствует в образцах преимущественно в восстановленном состоянии, что подтверждено данными РФЭ-спектроскопии. На основании проведенных исследований показана возможность применения таких гибридных наносистем в качестве перспективных носителей лекарственных препаратов в системах направленной доставки.

Ключевые слова: наночастицы серебра, гибридные наносистемы, супрамолекулярные агрегаты, холестерин, тиохолестерин, селективная адсорбция, системы направленной доставки лекарственных препаратов

DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-3-223-232

Благодарности. Авторы выражают благодарность канд. хим. наук, ст. науч. сотр. С.С. Абрамчуку за исследование образцов методом просвечивающей электронной микроскопии; науч. сотр. ИБХФ РАН В.Н. Морозову за участие в получении спектров КД; канд. хим. наук В.С. Неудачиной и вед. специалисту С.В. Дворяку (ЦКП «Нанохимия и Наноматериалы») за проведение регистрации РФЭ-спектров.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы развития Московского университета – 2024 в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова № AAAA-A21-121011590090-7.

Для цитирования: Громова Я.А., Громова С.А., Шабатина Т.И. Супрамолекулярные агрегаты серебро-холестерин и серебро-тиохолестерин: физико-химические свойства и перспективы биомедицинского применения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2025. Т. 66. № 3. С. 223–232.

ORIGINAL ARTICLE

**SILVER-CHOLESTEROL AND SILVER-THIOCHOLESTEROL
SUPRAMOLECULAR AGGREGATES: PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES
AND PROSPECTS FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS****Yana Andreevna Gromova¹, Sofya Andreevna Gromova¹, Tatyana Igorevna Shabatina^{1,2}**¹ Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry² N.E. Bauman Moscow State Technical University, Faculty of Basic Sciences**Corresponding author:** Yana Andreevna Gromova, chemyaninka@mail.ru

Abstract. Silver nanoparticles (SNPs) stabilized by mesogenic ligands cholesterol (Ch) and thiocholesterol (TCh) were prepared by borohydride reduction method. The average size of silver nanoparticles was (5.5 ± 1.0) nm and (2.7 ± 0.6) nm respectively. The UV-visible spectra of both samples showed an intense plasmonic absorption band with maxima at 430 nm and 470 nm respectively. The IR-spectroscopy results confirm the binding of surface silver atoms to the functional groups of the ligands which correlates with the previously obtained quantum-chemical calculations of the model systems. It's revealed that the introduction of silver nanoparticles into the liquid crystalline matrix extends the temperature range of its existence. Silver nanoparticles are predominantly present in the samples in the reduced state which is confirmed by XRD-spectra. Based on the results of studies fulfilled the possibility of using such hybrid nanosystems as promising drug delivery carriers was proposed.

Keywords: silver nanoparticles, hybrid systems, supramolecular aggregates, cholesterol, thiocholesterol, selective adsorption, directed drug delivery systems.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the Candidate of Chemical Sciences, senior researcher. Co-author S.S. Abramchuk for the study of samples by transmission electron microscopy; scientific. comp. IBHF RAS to V.N. Morozov for his participation in obtaining CD spectra; Candidate of Chemical Sciences V.S. Neuchodina and leading specialist S.V. Dvoryak (CCP "Nanochemistry and Nanomaterials") for registration of XFE spectra.

Financial Support. The work was financially supported by the Moscow University Development Program – 2024, under the state assignment of Lomonosov Moscow State University № AAAA-A21-121011590090-7.

For citation: Gromova Ya.A., Gromova S.A., Shabatina T.I. Supramolecular Aggregate Silver-Cholesterol and Silver-Thiocholesterol: Physico-chemical Properties and Prospects for Biomedical Application // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya. 2025. Т. 66. № 3. S. 223–232.

Гибридные системы, включающие наноразмерные частицы металлов, стабилизированные функциональной органической матрицей, вызывают интерес ученых благодаря их широкому применению в различных отраслях науки, нанотехнологиях, биомедицине [1–2]. Сочетание физико-химических свойств нанообъектов, обусловленных размерным эффектом, с возможностью их направленной организации с помощью жидкокристаллической матрицы лиганда открывают уникальные возможности для создания новых гибридных наноструктур.

Интенсивно развивающейся областью исследований является применение супрамолекуляр-

ных агрегатов в системах направленной доставки лекарственных веществ [3]. Перед традиционными формами лекарственных препаратов наноразмерные системы лекарственных веществ имеют существенные преимущества, такие как улучшенная биодоступность, уменьшение величины действующей концентрации, локальное воздействие на очаг поражения, снижение токсичности [4]. В ряде современных литературных источников [5–7] отмечено, что жидкокристаллические (ЖК) соединения находят применение в области медицины и фармации, поскольку часто являются амфифильными системами, сочетающими свойства твердых кристаллов, но при этом сохраня-

ющие подвижность жидкостей. Показано [6], что наличие упорядоченной ЖК-структуры для холестерина и его производных влияет на повышение вязкости, а это может являться дополнительным преимуществом при создании систем для направленной доставки лекарств. Жидкокристаллические свойства системы могут изменять кинетику высвобождения лекарственных веществ и снижать токсичность терапевтических препаратов, улучшая их клиническую эффективность.

В настоящей работе получены гибридные наносистемы на основе наночастиц серебра, стабилизированных холестеринowymi жидкокристаллическими лигандами – холестерином и тиохолестином, а также изучены их физико-химические свойства. Холестерин является одной из важнейших физиологических биомолекул, включение которых в клетку происходит с помощью эффекта «распознавания». В связи с этим гибридные структуры на основе холестерина (а также его производных) и НЧС имеют хорошие перспективы применения в целях создания современных систем направленной доставки лекарств как селективных адсорбентов и носителей лекарственных веществ. Кроме того, известно, что наночастицы серебра проявляют антибактериальные свойства [8–10]. Сочетание НЧС с холестерином и его производными может приводить к возникновению новых синергических терапевтических эффектов при селективном включении молекул природных и синтетических антибиотиков. Детальное изучение и описание физико-химических свойств таких гибридных наносистем необходимо для их использования в медицинской практике.

В настоящей работе представлены результаты детальных исследований физико-химических свойств двух гибридных металл-мезогенных наносистем на основе холестеринowych лигандов и наноразмерных частиц серебра: НЧС-холестерин и НЧС-тиохолестерин.

Экспериментальная часть

Синтез и стабилизация НЧС

Синтез НЧС проводили методом Бруста – Шифрина, основанном на восстановлении ионов серебра в двухфазной водно-органической системе с межфазным переносчиком. В качестве источника ионов серебра использовали азотно-кислое серебро (AgNO_3 , Merck; 99,99%), роль восстановителя выполнял борогидрид натрия (NaBH_4 , Merck; 99,99%), в качестве межфазного переносчика использовали тетраоктил аммоний бромид (ТОАБ) ($\text{C}_{27}\text{H}_{46}\text{S}$, Merck; 99,99%). Нитрат серебра и борогидрид натрия растворяли в дис-

тиллированной воде, а межфазный переносчик в толуоле (C_7H_8 , «ч.д.а.», «Химмед»). В процессе формирования НЧС проводили их стабилизацию следующими мезогенными лигандами: холестерин (99,99%, Merck, Германия), тиохолестерин (99,99%, Merck, Германия).

Просвечивающая электронная микроскопия

Электронные микрофотографии и дифрактограммы образцов НЧС получали с использованием электронного микроскопа марки Leo 912 AB Omega с ускоряющим напряжением 100 кВ (Carl Zeiss SMT AG Oberkochen, Германия). Образцы готовили нанесением 1–2 мкл золя полученных НЧС в гексане на покрытую формваром медную сетку ($d = 3,05$ мм), затем сушили на воздухе. Образцы вакуумировали (10^{-6} – 10^{-9} Торр) и регистрировали их электронные микрофотографии и электронные дифрактограммы. На основе полученных микрофотографий проводили статистическую обработку данных (выборка не менее 100–150 частиц) и представляли результаты в виде доверительного интервала среднего значения размера НЧС.

Спектроскопические исследования

Регистрацию ИК-спектров образцов проводили на ИК-Фурье спектрометре Tensorg II фирмы Bruker (Германия) в интервале частот колебаний от 400–4000 cm^{-1} при комнатной температуре. Так как полученные образцы являются твердыми, использовали сменный модуль нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) Eco-ATR с кристаллом ZnSe.

Регистрацию УФ-спектров поглощения в видимой области проводили в диапазоне длин волн 250–800 нм при комнатной температуре на спектрофотометре марки Jasco V-770 (Япония).

Оптическую активность приготовленных серий растворов наночастиц серебра фиксировали с помощью анализатора жидкости по принципу регистрации спектров кругового дихроизма (КД), универсального прибора СКД-2М в диапазоне длин волн 300–600 нм (в режиме накопления). Для управления работой анализатора использовали программный пакет DICHROMETR лаборатории ИБХФ РАН.

Дифференциальная сканирующая калориметрия

Определение температуры и теплоты фазовых переходов гибридных наносистем осуществляли на дифференциальном сканирующем калориметре

DSC 204 F1 Phoenix фирмы NETZSCH (Германия). В пустой алюминиевый тигель помещали точную навеску образца (порядка 10 мг), чтобы он полностью покрывал дно, и закрывали тигель проколотой крышкой с помощью прессы для холодной сварки. Нагрев проводили в температурном диапазоне от 25 до 200 °C со скоростью 10 °C/мин в токе аргона. Для дополнительного определения температуры разложения и остаточной массы образца помещали в тигель термогравиметрического анализатора TG 209 F1 Perseus фирмы NETZSCH (Германия) и регистрировали потерю массы образца при нагревании.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Для получения рентгеновских фотоэлектронных спектров был использован РФЭС-спектрометр Thermo Scientific Nexsa с монохроматическим источником рентгеновского излучения Al K α (1486,6 эВ, собственная полуширина линии 0,25 эВ). До проведения анализа энергетическая шкала спектрометра была предварительно откалибрована с использованием чистой поверхности металлической меди, золота и серебра по стандартной процедуре. Исследуемые образцы после фиксации на держателе переносили в вакуумную систему (давление в камере анализа в ходе получения спектров составляло

около 7×10^{-9} мбар). Сначала регистрировали обзорные спектры в диапазоне значений энергии связи 0–1360 эВ, после их анализа и определения качественного состава поверхности материала (ат.%) регистрировали детальные спектры Ag 3d, C 1s, O 1s, S 2p.

Результаты и их обсуждение

Известно [11–14], что НЧС в индивидуальном виде не используются на практике, поэтому необходима их стабилизация для предотвращения процесса агрегации в растворе. В настоящей работе в качестве стабилизаторов использовали мезогенные лиганды, представители холестерических жидких кристаллов: холестерин (Ch) и его S-содержащий аналог тиохолестерин (TCh). Эти соединения имеют схожую структуру, однако различаются природой своих функциональных групп, что влияет на прочность связывания поверхностных атомов серебра с функциональными группами лигандов (–ОН и –SH соответственно). Как показали ранее полученные результаты квантово-химических расчетов, представленные в работах [15–17], прочность связывания возрастает при увеличении размера кластера серебра и использовании в качестве стабилизирующего лиганда тиохолестерина. На рис. 1 представлены структурные формулы лигандов. Результаты ПЭМ подтвердили то, что тиохолестерин

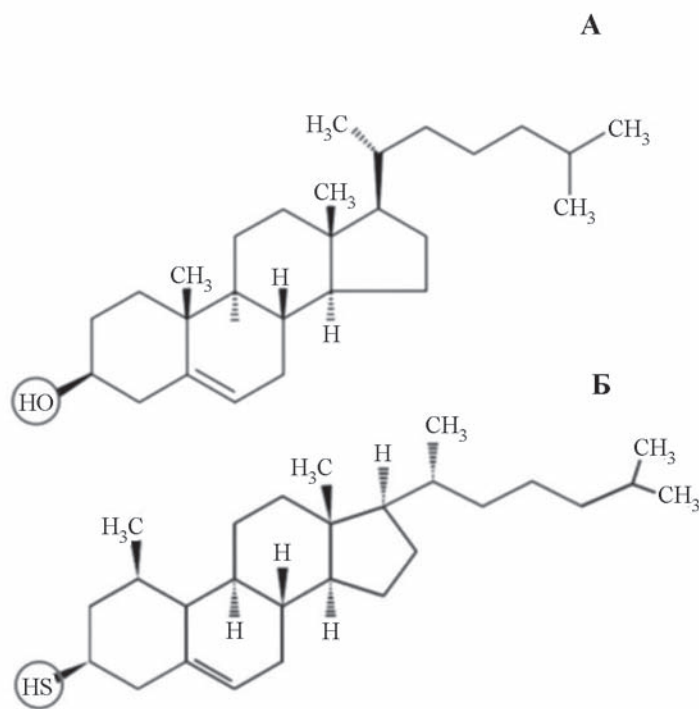


Рис. 1. Структурные формулы холестерина (А), тиохолестерина (Б)

является более сильным стабилизирующим лигандом НЧС. Средние размеры НЧС составили $(5,5 \pm 1,0)$ нм при стабилизации холестерином и $(2,7 \pm 0,6)$ нм при стабилизации тиохолестерином.

Известно [13], что НЧС, формирующиеся методом борогидридного восстановления, имеют положительную величину дзета-потенциала в диапазоне от 40–60 мВ. Следовательно, в процессе стабилизации образующиеся НЧС, которые имеют частично положительный поверхностный заряд, связываются с гетероатомами функциональных групп холестериновых лигандов. Таким образом, происходит формирование гибридных металл-мезогенных наносистем, которые можно представить как модель «ядро-оболочка», где роль ядра выполняют НЧС, а оболочки – мезогенные лиганды.

Электронные дифрактограммы образцов НЧС носят точечно-кольцевой характер, параметры кристаллической решетки серебра, рассчитанные по межплоскостным расстояниям от наиболее четко проявленных рефлексов, соответствуют гранецентрированной кубической решетке кристаллического серебра. НЧС образуют плотноупакованный слой на поверхности подложки и имеют сферическую форму. Средние размеры НЧС, стабилизированных холестерином и тиохо-

лестерином, составили: $(5,5 \pm 1,0)$ и $(2,7 \pm 0,6)$ нм (рис. 2).

Важным параметром, влияющим на размер формируемых НЧС, является не только природа функциональных групп лиганда, но и его количественное соотношение с НЧС. Для выявления размерного эффекта в работе были синтезированы три серии образцов на основе НЧС, стабилизированных тиохолестерином в разных мольных соотношениях (1:1, 1:2, 1:5). По результатам ПЭМ средние размеры НЧС составили соответственно $(2,1 \pm 0,6)$, $(2,3 \pm 0,4)$ и $(2,7 \pm 0,6)$ нм. Средний размер НЧС меняется незначительно. Доверительные интервалы средних значений размеров НЧС «перекрываются», сильный размерный эффект не был выявлен.

Оптические свойства НЧС сильно зависят как от характеристик самих частиц (размера и формы), так и от их окружения, в том числе от природы стабилизирующего лиганда. Характерной особенностью спектров поглощения и рассеяния ряда металлических наночастиц размером более 2 нм является наличие интенсивных полос поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в видимой области спектра, ближних ИК- и УФ-областях. Полоса плазмонного поглощения ППР является важной характеристикой спектров золей

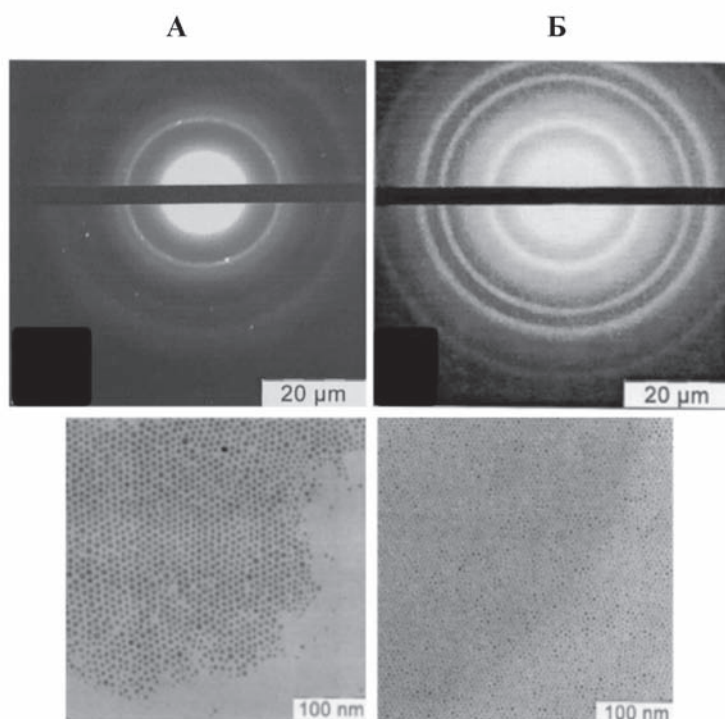


Рис. 2. Электронные дифрактограммы и микрофотографии НЧС, стабилизированных холестерином (А), тиохолестерином (Б)

наночастиц серебра в УФ и видимых областях спектра, свидетельствуя об образовании НЧС. Положение этой полосы в спектре может претерпевать сдвиг в зависимости от размера НЧС, природы стабилизирующего лиганда и его диэлектрической проницаемости (ϵ). В случае стабилизации НЧС холестерином максимум поглощения находится в диапазоне длин волн 420–430 нм. При стабилизации тиохолестерином происходит смещение полосы плазмонного резонанса в длинноволновую область, полоса ППР находится при длине волны 470 нм. Результаты можно объяснить следующим образом: тиохолестерин является более сильным стабилизирующим лигандом, поэтому для гибридной наносистемы НЧС-тиохолестерин на поверхности НЧС формируется «лигандная оболочка», имеющая большую диэлектрическую проницаемость по сравнению с системой НЧС-холестерин. Наблюдаемые полосы ППР характерны для сферических НЧС размером менее 10 нм, что согласуется с результатами, полученными методом ПЭМ (рис. 3).

Для подтверждения связывания лигандов с поверхностными атомами серебра были проведены исследования методом ИК-спектроскопии. Полученные результаты подтвердили эффект связывания поверхностных атомов серебра с гетеро-атомами функциональных групп лигандов. В ИК-спектре холестерина присутствует широкая полоса характеристических валентных колебаний ОН-группы в области 3200–3400 см^{-1} и деформационных колебаний ОН-группы в области 1100–1200 см^{-1} . В результате стабилизации НЧС холестерином происходит ковалентное связывание между поверхностными атомами серебра и функциональными группами холестерина. Это подтверждается ИК-спектром системы НЧС-

холестерин, который демонстрирует отсутствие поглощения деформационных и валентных колебаний ОН-группы. В ИК-спектре тиохолестерина присутствует интенсивная полоса характеристических валентных колебаний SH-группы в области 2800–2900 см^{-1} . В результате взаимодействия НЧС с тиохолестериновым лигандом происходит связывание между поверхностными атомами серебра и функциональными SH-группами тиохолестерина, в ИК-спектрах системы НЧС-тиохолестерин происходит уменьшение интенсивности поглощения в этой области спектра.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) является спектроскопическим методом исследования элементного состава, химического и электронного состояния атомов на поверхности изучаемого материала. Для линии серебра Ag 3d (дублет) в различных солях и соединениях серебра накоплено достаточно много литературных данных, систематизированных в базе данных NIST XPS и кратко обобщенных в литературе. Для линий Ag 3d обычно проводят анализ энергии связи более интенсивной компоненты дублета, Ag 3d 5/2, однако для степени окисления серебра (0) и (+1) она варьирует слабо. В связи с чем показательной является энергия связи для линии Ag 3d 3/2. Результаты исследования показали, что энергия пика Ag 3d 5/2 составляет 368 эВ, а энергия пика Ag 3d 3/2 составляет 374 эВ, что можно интерпретировать как формирование в системе НЧС не крупнее 6 нм (рис. 4). Результат находится в согласии с данными, полученными методом ПЭМ.

Из литературных данных [12] известно, что холестерин и его производные относятся к термотропным жидким кристаллам, проявляющим свои мезогенные свойства в определенном диапазоне

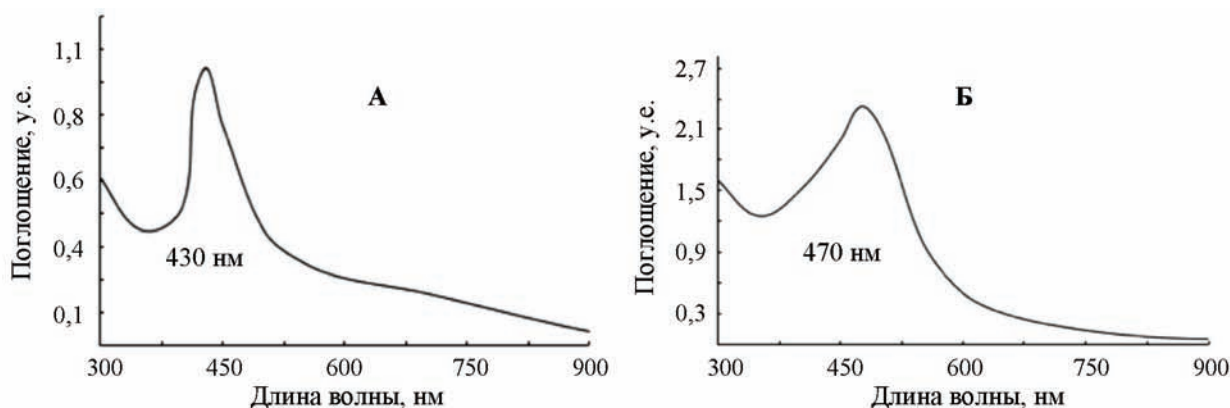


Рис. 3. УФ-спектры плазмонного поглощения НЧС, стабилизированных холестерином (А) и тиохолестерином (Б)

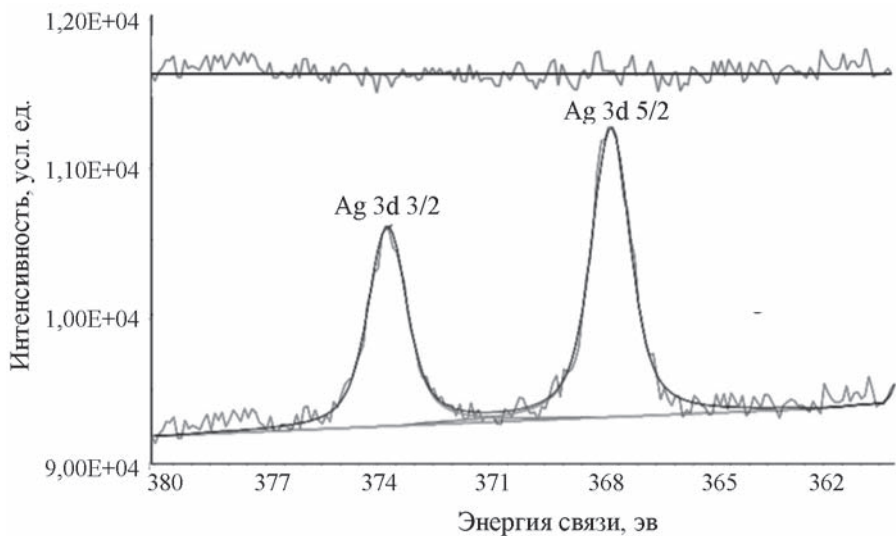


Рис. 4. РФЭ-спектр серебра, полученный методом РФЭС для системы НЧС-тиохолестерин

температуры при фазовых переходах твердый кристалл – изотропная жидкость. Поэтому температура фазовых переходов таких соединений является важным параметром для подтверждения их мезогенности, т.е. существования жидкокристаллической мезофазы в определенном температурном интервале. Установлено, что с ростом содержания серебра в образцах происходит расширение температурного диапазона существования холестерической мезофазы: наблюдаются фазовые переходы холестерин – изотропная жидкость в температурном диапазоне 81,1–145,5 °С для системы НЧС-тиохолестерин (1:5) и 78,0–144,6 °С для системы НЧС-тиохолестерин (1:2) (таблица). Тонкие пленки образцов НЧС-холестерин и НЧС-тиохолестерин толщиной в несколько микрон, помещенные между стеклами без специального покрытия, в поляризационном оптическом микроскопе (ПОМ) после цикла нагрев-охлаждение ($T = 25\text{ °C} (\times 100)$) демонстрируют яркие радужные текстуры, характерные для холестерических мезофаз. Таким образом, результаты ДСК и ПОМ позволяют сделать вывод о том, что включение НЧС придает гибридной наносистеме новые физико-химические свойства и фазовое поведение по сравнению со свойствами индивидуального лиганда – происходит расширение

температурного интервала существования холестерической мезофазы. Кроме того, холестерическая мезофаза сохраняется и существует вплоть до комнатной температуры. В рамках текущих исследований с использованием спектроскопии кругового дихроизма были получены спектры для систем НЧС-тиохолестерин. Для установления закономерности влияния содержания лиганда на оптическую активность образцов были проанализированы образцы с разным мольным соотношением НЧС-тиохолестерин (1:1, 1:2, 1:5). Включение НЧС в жидкокристаллическую матрицу тиюхолестерина приводит к образованию самоупорядоченных спиральных структур, индуцирует проявление оптической активности системы НЧС-тиохолестерин и появление интенсивного пика в спектре кругового дихроизма в полосе ППР серебряных наночастиц в области 450–470 нм (рис. 5), т.е. холестерический лиганд образует пространственно упорядоченную структуру, организующую НЧС в закрученную спираль. С увеличением концентрации стабилизированных наночастиц серебра оптическая активность гибридной системы растет. Пики, наблюдаемые в областях 325 и 410 нм соответствуют левовращающей форме молекулы оптически активного лиганда тиюхолестерина.

Фазовые переходы холестерин – изотропная жидкость для системы НЧС-тиохолестерин

НЧС : ТХол	T (К-ТХол), °C	T (ТХол-ИзоЖ), °C	T (Дестр.), °C
1:5	81,1	145,5	191
1:2	78,0	144,6	185

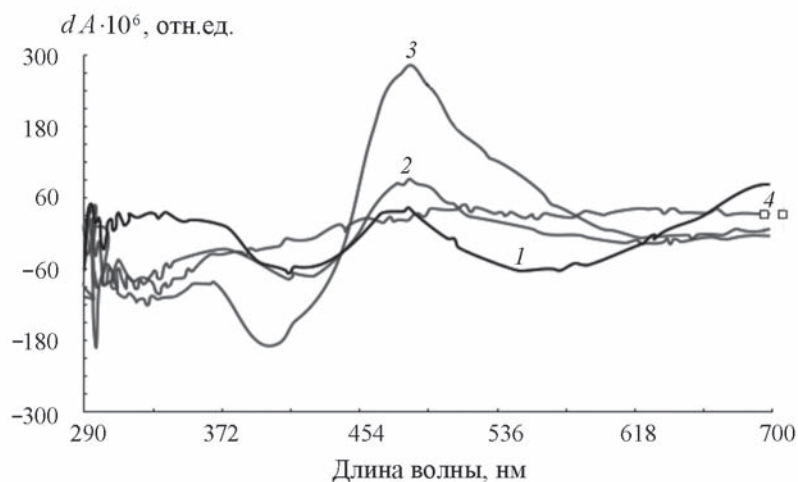


Рис. 5. Спектры кругового дихроизма растворов гибридных систем НЧС-ТХол (1 – НЧС-ТХол (1:1), 2 – НЧС-ТХол (1:2), 3 – НЧС-ТХол (1:5), 4 – индивидуального лиганда тиохолестерина

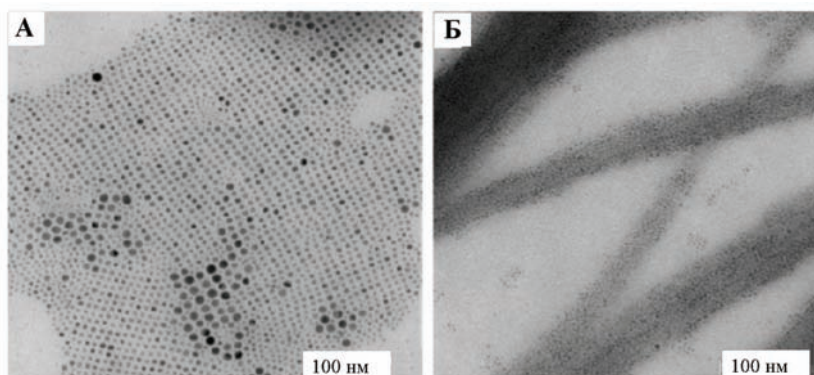


Рис. 6. ПЭМ-микрофотографии гибридной наносистемы НЧС-ТХол (А) – 2D-наноструктура с кубической симметрией, (Б) – 3D-наноструктура, полученная после удаления растворителя и выдерживания в холестерической мезофазе

Ранее в работах [18–21] нами была показана возможность использования таких систем для модификации поверхности частиц различных силикагелей. Было проведено получение силикагелевых частиц и силикагелевых пластин, покрытых слоем гибридных систем НЧС-холестерин и НЧС-тиохолестерин. Механизм поверхностной адсорбции можно описать следующим образом: SH-группа тиохолестерина (или OH-группа холестерина) эффективно взаимодействует с поверхностными атомами (центрами) НЧС в процессе их формирования и слабо смещают электронную плотность с холестеринового цикла. Серебро имеет частично положительный заряд, поэтому адсорбция гибридных НЧС обусловлена электростатическим взаимодействием между положительно заряженными поверхностными атомами

серебра и силанольными группами на поверхности частиц силикагеля [21].

Подобные супрамолекулярные агрегаты могут быть успешно использованы как эффективные носители структурно подобных лекарственных препаратов ввиду доказанных адсорбционных свойств с сохранением важнейших физико-химических характеристик: малый размер НЧС, жидкокристаллическая фаза лиганда, оптическая активность систем. Процесс формирования упорядоченных наноструктур можно описать следующим образом. Он начинается с образования отдельных НЧС в сильно разбавленных органических золях, стабилизированных холестерическим лигандом. С повышением концентрации НЧС и по мере удаления органического растворителя происходит образование

супрамолекулярных упорядоченных гибридных 2D- и 3D-наносистем с гексагональной или кубической симметрией. В холестерической мезофазе формируются протяженные ($l > 10$ мкм) линейные агрегаты, включающие цепочечные структуры НЧС ($d = 2,5$ нм) (рис. 6).

Заключение

В настоящей работе были получены гибридные наносистемы на основе НЧС, стабилизированных лигандами – холестерином и тиохолестерином. Рассмотрены результаты исследования структурных, оптических и мезогенных свойств полученных образцов. Показано, что НЧС имеют малый размер – 5,0 нм для холе-

стерина и 2,7 нм для тиохолестерина, введение НЧС расширяет температурный диапазон существования холестерической мезофазы лигандов, НЧ нульвалентного восстановленного серебра прочно связаны с функциональными группами лигандов-стабилизаторов.

Представляется возможным и адсорбция агрегатов на поверхность носителей разной природы, прежде всего биосовместимых с организмом человека, что перспективно для их использования в качестве систем направленной лекарственной доставки, в том числе и для транспортировки оптически активных лекарственных препаратов ввиду доказанной оптической активности гибридных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shabatina T.I., Vernaya O.I., Shimanovskiy N.L., Melnikov M.Y. // *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15. P. 1181 (<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15041181>).
2. Shabatina T.I., Vernaya O.I., Shabatin V.P., Melnikov M.Y., Semenov A.M., Lozinsky V.I. // *Appl. Sci*. 2020. Vol. 10. N. 170. P. 1–11 (<https://doi.org/10.3390/app10010170>).
3. Shabatina T.I., Gromova Y.A., Vernaya O.I., Soloviev A.V., Shabatin A.V., Morosov Yu.N., Astashova I.V., Melnikov M.Y. // *Pharmaceutics*. 2024. Vol. 17. P. 587 (<https://doi.org/10.3390/ph17050587>).
4. Gromova Y.A., Shabatina T.I. *Biotechnology – Biosensors, Biomaterials and Tissue Engineering – Annual Volume 2024* // IntechOpen London, UK (DOI: 10.5772/intechopen.115153).
5. Matthew G.K. Benesch, Ruthven N.A.H. Lewis, Ronald N. McElhaney // *Biochem. Biophys. Acta*. 2016. Vol. 1858. P. 168 (<https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2015.11.006>).
6. Hofmeister H., Miclea P.T., Mörke W. // *Part. Syst. Charact.* 2002. Vol. 19. P. 359 (DOI: 10.1002/1521-4117(200211)19:53.0.CO;2-B).
7. Chumanov G., Sokolov K., Gregory B.W., Cotton T.M. // *J. Phys. Chem.* 1995. Vol. 99. P. 9466 (<https://doi.org/10.1021/j100023a025>).
8. García M.C., Aloisio C., Onnainty R., Ullio-Gamboa G. // *Nanobiomat.* 2018. P. 41 (DOI: 10.1016/B978-0-08-100716-7.00003-9).
9. Tülden Inanan, Nalan Tüzmen, Sinan Akgöl, Adil Denizli // *Int. J. Biol. Macromol.* 2016. Vol. 92. P. 451 (DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.07.007).
10. Yvonne Lange, Theodore L. Steck // *Chem. Phys. Lipids*. 2016. Vol. 199. P. 74 (DOI: 10.1016/j.chemphyslip.2016.02.003).
11. Shabatina T.I. // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2011. Vol. 545. P. 1268 (DOI: 10.1080/15421406.2011.571971).
12. Shabatina T.I., Belyaev A.A., Sergeev G.B. // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2011. Vol. 540. P. 169 (DOI: 10.1080/15421406.2011.568835).
13. Andres R.P., Bielefeld J.D., Henderson J.I., Janes D.B., Kolagunta V.R., Kubiak C.P., Mahoney W.J., Osifchin R.G. // *Science*. 1996. Vol. 273. P. 1690 (DOI: 10.1126/science.273.5282.1690).
14. Ali Reza Kiasat, Roya Mirzajani, Fakhri Ataeian, Mehdi Fallah-Mehrjardi // *Chin. Chem. Lett.* 2010. Vol. 21. P. 1015 (<https://doi.org/10.1016/j.cclet.2010.05.024>).
15. Ermilov A.Yu., Shabatina T.I., Gromova Y.A. // *Mos. Univ. Chem. Bull.* 2022. Vol. 77. P. 65 (DOI: 10.3103/S0027131422070069).
16. Ermilov A.Yu., Shabatina T.I., Gromova Y.A. // *Mos. Univ. Chem. Bull.* 2022. Vol. 77. P. 13 (DOI: 10.55959/MSU0579-9384-2-2023-64-1-19-25).
17. Ermilov A.Yu., Lukyanova E.S., Gromova Ya.A., Shabatina T.I. // *Mos. Univ. Chem. Bull.* 2018. Vol. 73. P. 251 (DOI: 10.3103/S0027131418050048).
18. Gromova Y.A., Sarvin B.A., Shabatina T.I. // *Russ. J. of Phys. Chem. A*. 2019. Vol. 93. N. 2. P. 342 (DOI: 10.1134/S0036024419020134).
19. Shabatina T.I., Gromova Ya.A., Anistratova E.S., Belyaev A.A. // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2016. Vol. 632. N 1. P. 64 (DOI: 10.1080.15421406.2016.1185573).
20. Громова Я.А., Анистратова Е.С., Шабатина Т.И., Рожманова Н.Б., Шаповалова Е.Н., Шпигун О.А. // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия*. 2016. Т. 57. N 1. С. 35.
21. Громова Я.А. Дис. ... канд. хим. наук. 02.00.04 / М., 2019. 189 с.
22. Shabatina T.I., Belyaev A.A., Sergeev G.B. // *Bio-Nano Science*. 2013. Vol. 3. N. 3. P. 289.

Информация об авторах

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

Софья Андреевна Громова – студентка химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (sofya.gromova.2004@mail.ru);

Татьяна Игоревна Шабатина – зав. лабораторией химии низких температур, вед. науч. сотр. кафедры химической кинетики химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры химии факультета фундаментальных наук МГТУ имени Н.Э. Баумана, доктор хим. наук (tatyashabatina@yandex.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 05.10.2024;
одобрена после рецензирования 17.10.2024;
принята к публикации 24.10.2024.