

УДК 544.72.05

## **КОМПОЗИТНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ СЕРЕБРЯНОГО ОРГАНОЗОЛЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ SPIN-COATING**

**© 2026 г. А. Н. Колодин<sup>1, \*</sup>, Е. А. Зайцева<sup>1, 2</sup>, М. М. Сыроквашин<sup>1, 3</sup>, Е. А. Максимовский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 3,  
Новосибирск, 630090 Россия*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090  
Россия*

<sup>3</sup> *Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191,  
Новосибирск, 630049 Россия*

Поступила в редакцию 25.12.2025 г.

После доработки 31.01.2026 г.

Принята к публикации 04.02.2026 г.

Разработана методика получения композитных пленок на основе органозоля серебра (14 нм, 0.02 М), стабилизированного бис-(2-этилгексил)сульфосукцинатом натрия в *n*-декане. Подход основан на равномерном нанесении золя на стеклянную подложку с помощью метода spin-coating (относительная центробежная сила варьировалась от 0.1 до 280×g). Получены однородные, гидрофильные пленки, демонстрирующие наличие плазмонно-резонансного поглощения. Увеличение объема наносимого органозоля от 10 до 50 мкл позволяет влиять на поверхностные, механические и оптические свойства покрытий. Среднеквадратичная шероховатость, модуль Юнга и интенсивность поглощения меняются от 6±2 до 38±20 нм, от 24.2±0.5 до 131±8 кПа и от 0.06 до 0.14 соответственно. Показано, что предложенный подход может быть расширен на применение дисперсных систем частиц других материалов (золота, оксидов железа и т.д.) с целью создания на их основе пленок с иными оптическими характеристиками, а также дополнительными магнитными свойствами.

*Ключевые слова:* spin-coating, органозоль, наночастица серебра, поверхностный плазмонный резонанс, смачиваемость

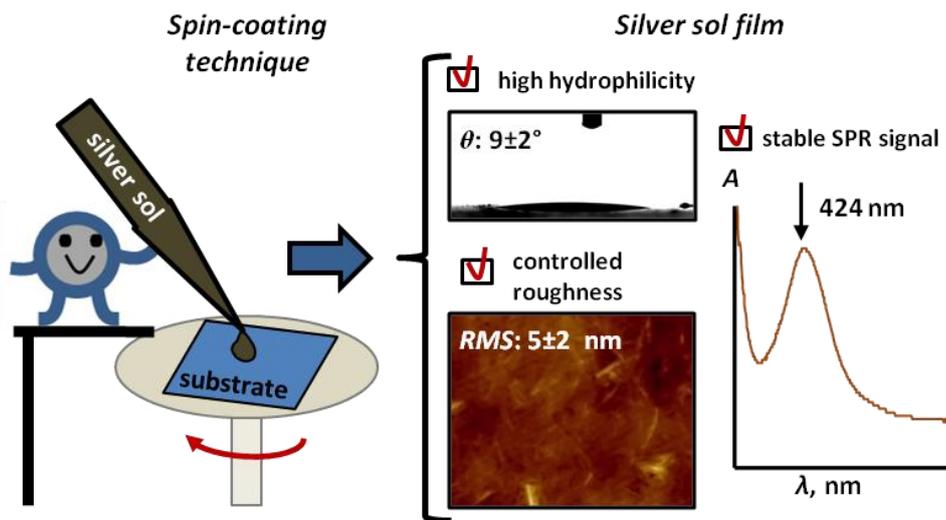
# SILVER ORGANOSOL COMPOSITE FILMS PREPARED BY SPIN-COATING METHOD

© 2025 г. A. N. Kolodin<sup>1, \*</sup>, E. A. Zaitseva<sup>1, 2</sup>, M. M. Syrokvashin<sup>1, 3</sup>, E. A. Maksimovskiy<sup>1</sup>

The procedure for preparation of the composite films based on a silver organosol (14 nm, 0.02 M) stabilized by sodium bis(2-ethylhexyl) sulfosuccinate in *n*-decane was proposed. The procedure is based on the uniform deposition of the organosol onto the glass substrate using the spin-coating technique. The relative centrifugal force value is changed from 0.1 to 280×g. Uniform, hydrophilic films exhibiting a surface plasmon resonance (SPR) signal are obtained. The organosol volume increase from 10 to 50 μL allows one to affect the surface, mechanical, and optical properties of the obtained films. The root mean square roughness, Young's modulus, and SPR signal intensity change from 6±2 to 38±20 nm, from 24.2±0.5 to 131±8 kPa, and from 0.06 to 0.14, respectively. The proposed procedure allows one to use various organosols of metals and their compounds (e.g., gold, iron oxides, etc.) for the preparation of films with promising functional optic and magnetic properties.

*Keywords:* spin-coating technique, organosol, silver nanoparticle, surface plasmon resonance, wettability

ГРАФИЧЕСКИЙ АБСТРАКТ (А. Н. Колодин)



## ВВЕДЕНИЕ

Современный тренд на развитие технологий создания портативных оптических устройств требует привлечения все новых синтетических подходов для формирования однородных покрытий, обладающих стабильным сигналом поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Одними из таких систем являются композитные пленки с наночастицами серебра [1–5]. Выбор наночастиц серебра в качестве источников плазмона позволяет повысить рабочие характеристики конечных сенсоров (в частности, их точность и чувствительность) [6]. В результате, такие устройства сегодня хорошо зарекомендовали себя при анализе продуктов питания [7–10] и лекарственных препаратов [11–13], а также активно используются при мониторинге состояния окружающей среды [9, 14–16].

В виду высокого потенциала соответствующих ППР сенсоров, в литературе сегодня предложено множество способов получения серебряных покрытий с применением методов химического (CVD) и физического (PVD) осаждения из газовой фазы [17, 18], химического осаждения из растворов [19, 20], а также низкотемпературных подходов, таких как: доктор Блейд [21], осаждение погружением подложки (dip-coating) [22, 23], нанесение на вращающуюся подложку (spin-coating) [24] и Ленгмюр–Блоджетт [25–27]. Вместе с тем все больше внимания исследователи уделяют именно низкотемпературным подходам, поскольку они позволяют значительно расширить диапазон применяемых материалов в качестве подложек для осаждения частиц за счет привлечения полимеров с низкой точкой плавления (полистирола, политетрафторэтилена (ПТФЭ) и т.д.) [22]. При этом наиболее перспективными системами для нанесения являются стабильные органо- и гидрозоли, обеспечивающие равномерное распределение частиц на поверхности подложки при сохранении их дисперсности и формы [22, 28].

Между тем, «плазмонизация» поверхности с помощью таких подходов имеет ряд ограничений, препятствующих их более широкому распространению.

1. Процесс осаждения частиц из золя является трудно контролируемым. Высокая концентрация поверхностно-активных веществ (ПАВ), необходимая для сохранения дисперсного состава наночастиц, практически сразу приводит к полному заполнению поверхности подложки молекулами стабилизатора [28, 29]. Варьирование поверхностных свойств покрытий (шероховатости, морфологии и т.д.) в таких условиях при отсутствии внешних воздействий (нагревания, химического травления и т.д.) практически не представляется возможным.

2. Интенсификация процессов осаждения наночастиц и ПАВ приводит к получению толстых пленок [21, 22, 30]. При этом толщина пленок может быть непостоянной и существенно варьироваться от участка к участку, что негативно сказывается на воспроизводимости оптических свойств конечного покрытия.

3. Эффект «кофейных колец» может значительно влиять на морфологию будущего покрытия при его формировании на стадии высушивания [31].

Для решения вышеуказанных проблем в данной работе предложена методика формирования серебряных пленок методом spin-coating. Нанесение золя происходит при поступательном увеличении скорости вращения, что позволяет минимизировать эффект «кофейных колец» и получить образцы фиксированной толщины. Варьирование объема наносимого золя позволяет значительно влиять на морфологию и шероховатость конечной пленки в широком диапазоне значений, а также регулировать интенсивность ее ППР сигнала.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Материалы и реактивы*

В работе использовались реактивы и материалы: дистиллированная вода, соляная кислота (99%, ОАО «Реактив»), азотная кислота (99%, ОАО «Реактив»), перекись водорода (медицинская, ГОСТ 177-88), аммиак (99%, ОАО «Реактив»), моногидрат гидразина (99%, ЗАО «Вектон»), *n*-декан (99%, ОАО «Реактив»), этанол (99%, ОАО «Реактив»), ацетон (99%, ОАО «Реактив»), бис(2-этилгексил)сульфосукцинат натрия (АОТ, 97%, «Sigma Aldrich»), нитрат серебра (99%, ОАО «Уральский завод химических реагентов»), металлическое золото (99.9%, «Sigma Aldrich»), калий гидроксид (99%, ООО «АО РЕАХИМ»), хлорное железо 6-ти водное («Solins») и стеклянные подложки (СП-7102, ООО «МиниМед»).

#### *Получение наночастиц*

Наночастицы серебра синтезированы в обратных мицеллах АОТ/*n*-декан (0.25 М, 20 мл) согласно ранее разработанной методике [22]. В мицеллярный раствор при перемешивании по каплям добавляли водный раствор нитрата серебра (0.3 М, 4 мл), а затем – гидразина (10 М, 4 мл). Далее реакционную смесь оставляли на магнитной мешалке (60 мин при 100 об/мин) при комнатной температуре. По окончании синтеза полученный золь очищали от воды и грубодисперсного осадка серебра с помощью центрифугирования (10 мин при 1500 об/мин), а затем обезвоживания на магнитной мешалке (2 ч при 100 об/мин).

Золь золота получали в режиме динамической эмульсии [28]. Предварительно водный раствор золота (III) (составом 0.02 М  $\text{HAuCl}_4 + 3 \text{ M HCl}$ ) готовили путем растворения металлического золота в «царской водке» и последующим разбавлением соляной кислотой до соответствующей концентрации. Далее в раствор АОТ/*n*-декан (0.25 М, 20 мл) при перемешивании последовательно вводили водные растворы  $\text{HAuCl}_4$  (0.02 М, 10 мл) и гидразина (10 М, 10 мл). Синтез частиц проводили при комнатной температуре и перемешивании (100 об/ мин) в течение 1 ч, после чего реакционная смесь разрушалась в

термостате при 60°C в течение 35–40 мин, а затем подвергалась процедурам центрифугирования и обезвоживания при условиях, аналогичным представленным ранее.

Наночастицы оксида железа (III) синтезированы с помощью микроэмульсионного метода получения. Обратном-мицеллярный раствор АОТ/*n*-декан (0.25 М) делили на две равные порции по 10 мл. В первую порцию раствора с помощью инъекционной солюбилизации вводили водный раствор хлорного железа (0.028 М, 200 мкл), а во вторую – раствор калия гидроокиси (0.28 М, 200 мкл), после чего растворы смешивались между собой в соотношении 1:1 по объему. Конечное значение солюбилизационной емкости составило 2 об. %. Далее реакционную смесь оставляли на сутки при комнатной температуре.

#### *Характеризация наночастиц*

Спектр поглощения частиц записывали относительно *n*-декана на спектрофотометре UV-1700 (Shimadzu, Япония). Диапазон длин волн составлял от 300 до 800 нм. Длина оптического пути – 1 см.

Эффективный гидродинамический диаметр частиц ( $D_h$ ) определяли на спектрометре NanoOmni (Brookhaven, США) в режиме фотонной корреляционной спектроскопии (ФКС). Непосредственно перед измерением золь очищали от пыли путем пятикратного фильтрования через ПТФЭ фильтр с диаметром пор 200 нм. Измерения проводились под углом 90° к источнику излучения. Мощность лазера с длиной волны 640 нм составляла 35 мВт. Параметр  $D_h$  рассчитывали согласно уравнению Стокса–Эйнштейна для частиц сферической формы. Расчет среднего значения проводился на основании анализа выборки из 30 измерений.

#### *Получение пленок*

Формирование пленок проводили с помощью метода spin-coating. Предварительно поверхность стеклянных подложек ( $2.5 \times 2.5 \text{ см}^2$ ) подвергали процедуре пробоподготовки [32]. Подложки очищали в этаноле, ацетоне и дистиллированной воде путем их последовательного погружения в соответствующие чистые растворители на 25–30 с. Затем стеклянную поверхность подвергали дополнительному химическому травлению в смеси  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (соотношение 1:1:1 по объему) в течение 30–40 с, после чего сушили в потоке азота.

Аликвоту органозоля (10–50 мкл) наносили на центральную область подложки с помощью микродозатора, после чего подложку размещали в spin coater (Schwan technology, EZ4 Spin Coater) и подвергали вращению. Диаметр ротора составлял 1 см. Относительную центробежную силу увеличивали постепенно в четыре этапа: 0.1 (I), 1.0 (II), 11.2 (III) и  $280 \times g$  (IV), – в течение 3.5 мин. Продолжительность каждого этапа составляла ~100 с. По окончании процедуры пленки оставляли на воздухе в течение суток при комнатной температуре. Фоновый образец получали аналогичным образом путем нанесения 10 мкл 0.25 М раствора АОТ в *n*-декане.

#### *Характеризация пленок*

Наличие крупных дефектов на поверхности, а также структур по типу «кофейные кольца» устанавливали с помощью оптического микроскопа Celestron, оснащенного LCD-экраном II. Съемку выполняли при увеличении 4х в режиме обратного света.

Комплексное исследование морфологии, шероховатости, толщины, а также магнитных и механических свойств проводилось с помощью сканирующей зондовой лаборатории Ntegra Prima II (NT-MDT, Россия). Все измерения были выполнены при температуре  $24.1^\circ\text{C}$  и относительной влажности 11.7%. Параметры измерительных зондов: резонансная частота ( $\nu_{\text{pr}}$ ), силовая константа ( $k_{\text{pr}}$ ), ширина балки ( $w_{\text{pr}}$ ), длина балки ( $l_{\text{pr}}$ ),

толщина балки ( $z_{pr}$ ), а также радиус закругления и угол раствора конуса иглы ( $r_{pr}$  и  $\varphi_{pr}$  соответственно) представлены в Табл. 1. Обработка результатов выполнялась с помощью программного обеспечения Nova SPM.

Таблица 1. Параметры измерительных зондов для микроскопических исследований

Зонд	$l_{pr}$ , МКМ	$w_{pr}$ , МКМ	$z_{pr}$ , МКМ	$\nu_{pr}$ , КГц	$k_{pr}$ , Н/м	$r_{pr}$ , НМ	$\varphi_{pr}$ , °
NSG10	125	27	2.75	240	11.8	10	10
HA_FM	223	34	3	77	3.5	10	30
MFM01	225	28	3	70	3.0	50	10

Детализацию морфологии проводили в полуконтактном режиме с помощью зонда NSG 10. Площадь скана и скорость сканирования составили  $25 \times 25$  мкм<sup>2</sup> и 20 мкм/с соответственно. Расчеты параметров морфологии – асимметрии и эксцесса профиля ( $R_{sk}$  и  $R_{ku}$  соответственно), а также параметров шероховатости – среднего арифметического и среднеквадратичного отклонений профиля ( $R_a$  и  $R_q$  соответственно) – были проведены в соответствии с ГОСТ 4287 [33] по результатам анализа профилей 6 сканов, сделанных на разных участках поверхности образца. Оценка среднего значения толщины пленки ( $h_z$ ) была выполнена путем анализа серии из 10 профилей, сделанных в области края образца.

Исследование механических свойств проводили в режиме силовой спектроскопии с помощью зонда HA\_FM. Значения работы адгезии ( $W_a$ ) и модуля Юнга ( $E$ ) были рассчитаны с помощью уравнений Дерягина–Мюллера–Топорова и Герца соответственно [34, 35]. Расчет средних значений параметров проводился на основании анализа выборки из 30–50 измерений.

Изучение магнитных свойств проводили с помощью зонда MFM01. Запись магнитных карт выполнялась на расстоянии ~5 нм от поверхности образца в режиме

магнитной силовой микроскопии. Площадь картирования и скорость записи составили  $25 \times 25$  мкм<sup>2</sup> и 20 мкм/с соответственно.

Элементный состав пленок устанавливали на растровом электронном микроскопе Jeol JSM 6700F (Jeol, Япония), оснащенный приставкой для энергодисперсионной спектроскопии EDS Bruker Quantax 200 с детектором X-Flash 6|60. Энергия электронного пучка при записи спектров составляла ~15 кэВ. Непосредственно перед съемкой поверхности образцов были металлизированы слоем золота (~10 нм) на установке ионного распыления Ion Sputter JFC-1100 (Jeol, Япония) с целью минимизации поверхностного заряда в области сканирования. Сила тока и напряжение составляли ~10 мА и 0.5 кВ соответственно.

Анализ химической структуры проводили методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Спектры были получены на спектрометре ESCALAB-220i с монохроматическим источником рентгеновского излучения MgK $\alpha$  ( $h\nu=1253.6$  эВ). Исследуемые образцы фиксировались на держателе с помощью токопроводящего двухстороннего углеродного скотча. Перед измерениями шкала энергии связи спектрометра калибровалась по линиям положения металлического золота Au4f<sub>7/2</sub> (84.0 эВ) и меди Cu2p<sub>3/2</sub> (932.6 эВ). Измеренные значения энергии связи корректировались с использованием линии углерода C1s (284.8 эВ), соответствующей адсорбированным атомам углерода в приповерхностных слоях образцов. Погрешность измерения энергии связи составляла 0.2 эВ. Обработка спектров РФЭС проводилась в программном пакете CasaXPS 2.3.15 [36].

Наличие гидрофильных свойств устанавливали методом определения углов смачивания с помощью оптического гониометра OCA 15 PRO (DataPhysics Instruments, Германия). Измерение углов ( $\theta$ ) проводили на открытом воздухе в режиме сидячей капли спустя 2–3 с после высаживания. Температура и относительная влажность были равны

24.3°C и 12% соответственно. Обработку изображений капель тестовой жидкости проводили по алгоритму Юнга–Лапласа с помощью программного обеспечения SCA 20. Среднее значение параметра  $\theta$  устанавливали на основании анализа выборки из 3–5 измерений.

Спектры поглощения пленок записывали относительно чистой подложки на спектрофотометре UV-1700 (Shimadzu, Япония). Диапазон длин волн составлял от 300 до 800 нм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Органозоль серебра*

Исследование оптических свойств показывает, что полученный органозоль обладает ППР сигналом (Рис. 1а). Системе соответствует полоса поглощения на длине волны 416 нм, характерной для наночастиц серебра [21, 22, 30]. Концентрация металла с учетом литературного значения мольного коэффициента поглощения ( $1.1 \cdot 10^4$  л/(моль·см) [37]) составила 0.02 М.

**Рис. 1.** Серебряный органозоль: (а) спектр поглощения, (б) функция распределения наночастиц по гидродинамическому диаметру. Образец разбавлен *n*-деканом в 630 раз.

Вместе с тем относительно небольшая полуширина полосы поглощения позволяет говорить о монодисперсности наночастиц серебра. Дополнительных полос поглощения в области спектра не выявлено, что косвенно свидетельствует об отсутствии агрегации частиц в органозоле. Данный факт подтвержден независимым методом. Согласно данным ФКС (Рис. 1б), образец характеризуется мономодальным распределением частиц по

гидродинамическому диаметру ( $D_n$ ). Размах функции не превышает 5 нм. Среднее значение  $D_n$  практически соответствует наиболее вероятному и составляет  $\sim 14$  нм. Низкая полидисперсность источников плазмонного поглощения обусловлена наличием развитого слоя АОТ, препятствующего протеканию коагуляционных процессов [38].

### *Морфология пленок*

Равномерное нанесение свежеприготовленного золя серебра на поверхность стеклянной подложки с помощью метода spin-coating позволяет получить однородные пленки (Рис. 2). Результаты детализации поверхности подложки, фонового образца, а также пленок на основе органозоля представлены на Рис. 3 и в Табл. 2. Осаждение золя приводит к полному заполнению поверхности стекла (Рис. 2, Рис. 3в–3е). На сканах атомно-силовой микроскопии (АСМ) и снимках оптической микроскопии отсутствуют крупные дефекты (трещины, сколы и т.п.), а также крупные объекты радиального характера, связанные с интенсификацией эффекта «кофейных колец». Вместе с тем АСМ-профиль поверхности исходной подложки значительно меняется при сорбции наночастиц, а также молекул их стабилизатора. Частота выступов уменьшается, тогда как их ширина и высота повышаются (Рис. 3а, 3в–е). При этом параметр  $R_{ku}$  снижается (Табл. 2). Таким образом, шиповидный характер профиля ( $R_{ku} > 3$  [39]) становится менее выраженным. Данный эффект обусловлен высокой концентрацией ПАВ в наносимом золе (0.25 М). Осаждение мицеллярного раствора с соответствующей концентрацией АОТ без наночастиц приводит к аналогичным изменениям поверхностных свойств (Рис. 3б).

**Рис. 2.** Данные оптической микроскопии: снимки поверхности пленок на основе (а) 10 и (б) 50 мкл золя.

**Рис. 3.** Данные АСМ: 3D-скан (пунктиром отмечен участок записи профиля, стрелкой указано направление сканирования), профиль и функция распределения по высоте для (а) подложки, (б) фонового образца, а также пленок на основе (в) 10, (г) 20, (д) 30 и (е) 50 мкл золя серебра.

Тем не менее, нанесение золя, а также мицеллярного раствора не позволяет получить образцы с высоко симметричным профилем (Рис. 3, Табл. 2). Значение  $R_{sk} > 0$  для всех систем. Таким образом, выступы поверхности по-прежнему преобладают над впадинами.

Таблица 2. Параметры морфологии и шероховатости

Образец	V, мкл	$R_a$ , нм	$R_q$ , нм	$R_{sk}$	$R_{ku}$
Подложка	–	0.4±0.1	0.8±0.3	3±1	15±9
Фон	–	5±2	7±3	0.6±0.4	4±1
Пленка	10	5±2	6±2	0.7±0.6	5±3
	20	16±5	25±9	1.9±0.5	8±2
	30	18±4	27±7	1.3±0.9	7±3
	50	25±13	38±20	1.6±0.9	7±3
	50*	24±15	35±25	1.5±1.2	7±5

\*Данные образца после шести месяцев хранения.

В случае пленок данный тренд сохраняется при увеличении объема наносимого органозоля. Однако погрешность параметров морфологии повышается на 30–40%. Более подробная детализация поверхности пленок выявила наличие выступов «лепесткообразной» формы (Рис. 4), характерной для органозольных покрытий на основе АОТ [22, 31]. Рост объема приводит к увеличению численной концентрации, а также

высоты соответствующих пиков ( $h_{AOT}$ ), что сказывается на повышении полидисперсности выборки параметров морфологии (Табл. 2).

**Рис. 4.** Данные АСМ: 2D-скан (пунктиром отмечен участок записи профиля, стрелкой указано направление сканирования), профиль выступов АОТ (красной стрелкой отмечена средняя высота выступов) в пленках на основе (а) 10, (б) 20, (в) 30 и (г) 50 мкл золя серебра.

Отметим дополнительные факторы, способствующие усилению данного эффекта: хаотичный характер распределения выступов на поверхности, а также рост количества слоев АОТ в формируемой пленке. Согласно данным АСМ, значение толщины пленок  $h_z$  повышается с  $3.3 \pm 0.2$  до  $3.7 \pm 0.6$  мкм (Рис. 5). Таким образом, получены толстые пленки ( $h_z > 100$  нм), что в целом коррелирует с литературными данными других аналогичных покрытий на основе органозолой серебра [21, 22, 30]. Пленки имеют четко выраженный край. Характерные профили демонстрируют резкое падение на границе пленка/подложка вследствие подавления эффекта «кофейный колец» за счет последовательного увеличения скорости вращения подложки при формировании соответствующего образца.

**Рис. 5.** Оценка толщины пленок на основе (а) 10 и (б) 50 мкл золя серебра. Пунктиром отмечен участок записи профиля на 2D-скане края пленки; стрелкой указано направление сканирования.

#### *Шероховатость пленок*

Изменения в морфологии пленок сопровождаются ростом их шероховатости (Рис. 3, Табл. 2). Параметры  $R_a$  и  $R_q$  монотонно повышаются с увеличением объема наносимого

золя. Шероховатость покрытий соответствует 12–14 классам шероховатости [40]. При этом значения характеристических параметров во многом обусловлены сорбционными процессами молекул АОТ на поверхность стекла. Показатели  $R_a$  и  $R_q$  для пленки на основе 10 мкл золя, а также фонового образца сопоставимы. Кроме того, изменения параметров  $R_a$  и  $R_q$  согласуются с динамикой роста высоты характеристических выступов ПАВ ( $h_{АОТ}$ ) на поверхности пленок. Сопоставление данных Табл. 2 и Рис. 4 показывает наличие корреляционных зависимостей (Рис. 6):

$$h_{АОТ} = 12.034R_a - 44.544, \quad (1)$$

$$h_{АОТ} = 7.4585R_q - 31.004, \quad (2)$$

коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) которых близки к 1.000 и составляют 0.991 и 0.980 соответственно, что свидетельствует о высокой степени корреляции экспериментальных данных.

**Рис. 6.** Корреляционные зависимости высоты выступов АОТ от (а) среднего арифметического отклонения профиля и (б) среднеквадратичного отклонения профиля.

Отметим, что экстраполяция эмпирических зависимостей в область минимальных значений не позволяет достичь нулевой шероховатости при полном отсутствии выступов ПАВ на поверхности пленки. Данный факт обусловлен вкладом подложки (Табл. 2), а также геометрическими параметрами измерительных АСМ-зондов (в частности параметров  $r_{pr}=10$  нм и  $\varphi_{pr}=10^\circ$ , Табл. 1), накладывающих определенные инструментальные ограничения при сканировании образцов с минимальными параметрами шероховатости [41, 42].

В свою очередь, более общее описание области сканирования образцов показывает, что распределение пленок по высоте  $z$  является мономодальным. При этом оно не

соответствует распределению Гаусса и является асимметричным (Рис. 3). Отношение  $R_q/R_a$  для всех образцов превышает константу Уорда ( $R_q/R_a=1.25$  [43]) и варьируется от 1.31 до 1.54 (Табл. 3). Вместе с тем среднеквадратичное отклонение и размах функции ( $S_q$  и  $S_t$  соответственно) в целом увеличиваются до ~43 и 700 нм соответственно, а коэффициент симметрии ( $S_{sk}$ ) смещается в область положительных значений и достигает 3.83 вследствие роста  $h_{AOT}$  (Рис. 4). Высокое значение параметра ( $S_{sk} \gg 1$ ) указывает на преобладание аксиальной ориентации выступов АОТ на поверхности пленки.

Таблица 3. Параметры функций распределения по высоте для поверхности АСМ-сканов (Рис. 3)

Образец	$V$ , мкл	$R_q/R_a$	$S_q$ , нм	$S_t$ , нм	$S_{sk}$
Подложка	–	1.89	1.7	36	7.72
Фон	–	1.32	8.7	134	–1.36
Пленка	10	1.31	7.3	103	–0.82
	20	1.54	40.3	719	3.83
	30	1.46	43.7	770	2.52
	50	1.48	42.9	470	2.64

#### *Состав и химическая структура пленок*

Контролируемое осаждение органозоля на поверхность стекла приводит к формированию пленок с многоэлементным составом (Рис. 7). Отметим, что присутствие спектральных линий элементов подложки на обзорных спектрах не связано с наличием дефектов или развитой пористой структуры у исследуемых образцов (Рис. 3 и 4), а обусловлено исключительно высокой энергией сканирующего электронного пучка (~15 кэВ). В Табл. 4 представлены относительные значения концентраций элементов пленок

(Ag, S, Na, C и O). Установлено, что в образцах преобладают элементы, входящие в состав молекул АОТ. При этом содержание Ag не превышает 1 масс. %.

**Рис. 7.** Энергетические спектры пленок на основе (а) 10 и (б) 50 мкл золя серебра.

Наличие спектральной линии Au обусловлено металлизацией поверхности пленок в процессе пробоподготовки.

Таблица 4. Элементный состав пленок (данные приведены в масс. % за вычетом концентраций элементов подложки)

V, мкл	C <sub>m</sub> , масс. %				
	C	O	Na	S	Ag
10	31.7	57.0	10.0	1.2	0.1
50	73.8	16.9	5.2	3.5	0.6

Подробный анализ поверхности одного из образцов методом РФЭС продемонстрировал наличие сложной химической структуры у полученных плёнок. На обзорном спектре присутствуют линии, соответствующие элементам Ag, S, Na, C и O (Рис. 8). Необходимо отметить, что в данном случае наблюдаются только линии элементов, относящихся непосредственно к составу плёнок. Энергии связи основных компонент Ag3d-, C1s-, O1s-, S2p- и Na1s-линий приведены в Табл. 5. В случае атомов серебра Ag3d-спектр представляет собой суперпозицию линий, соответствующих спин-орбитальному расщеплению Ag3d-уровня на Ag3d<sub>5/2</sub>- и Ag3d<sub>3/2</sub>-компоненты с величиной расщепления ~6 эВ. Энергия связи основной Ag3d<sub>5/2</sub>-линии (~368.2 эВ) соответствует атомам серебра в состоянии Ag<sup>0</sup> [44, 45]. Таким образом, можно заключить, что в пленке окисление наночастиц не происходит вследствие наличия слоя АОТ, покрывающего их. Наличие

соответствующего слоя подтверждается сложной структурой  $C1s$ -линии. Линия может быть разложена на несколько компонент. Так, компоненты с энергией связи  $\sim 284.7$ ,  $286.4$ ,  $288.7$  и  $290.3$  эВ относятся к функциональным группам ПАВ ( $C=O$ ,  $O-C=O$ ,  $C-O-C$ ,  $C-C$  и  $C-H$ ). При этом наличие компоненты с энергией связи  $\sim 286.4$  эВ ( $C-OH$  группа) может также указывать на присутствие незначительного количества молекул воды, адсорбированных в органическом слое стабилизатора. Энергии связи  $S2p_{3/2}$ - ( $\sim 168.1$  эВ) и  $Na1s$ - ( $\sim 1071.3$  эВ) линий относятся к атомам серы в составе  $SO_3$ -групп и атомам натрия в составе молекул АОТ. В случае  $O1s$ , спектр содержит три компоненты с энергиями связи  $\sim 531.7$ ,  $533.5$  и  $535.6$  эВ, что соответствует наличию связей  $O=C$ ,  $O-C$  и  $O=S=O$ , а также адсорбированных атомов кислорода [44, 45]. Таким образом, полученные пленки представляют собой композитные покрытия, состоящие из отдельных наночастиц металла, инкапсулированных в органический слой стабилизатора. Полученные результаты соответствуют данным для аналогичных систем на основе дисперсных систем наночастиц, стабилизированных ПАВ [22, 28].

**Рис. 8.** Обзорный спектр РФЭС и  $Ag3d$ -,  $C1s$ -,  $O1s$ -,  $S2p$ - и  $Na1s$ -области для пленки на основе 50 мкл золя серебра.

Таблица 5. Энергия связи (эВ) основных компонент  $Ag3d_{5/2}$ -,  $S2p_{3/2}$ -,  $Na1s$ -,  $C1s$ - и  $O1s$ -линий пленки на основе 50 мкл золя серебра (погрешность измерения энергии связи составляет  $\pm 0.2$  эВ)

$Ag3d_{5/2}$	$S2p_{3/2}$	$Na1s$	$C1s$	$O1s$
368.2	168.1	1071.3	284.8	531.7
369.8		1073.0	286.4	533.5
			288.7	535.6

			290.3	
--	--	--	-------	--

Важным дополнением к описанию химической структуры является информация об ориентации молекул ПАВ на поверхности пленки. Исследование смачиваемости образцов водой показывает (Рис. 9), что независимо от объема наносимого золь все системы демонстрируют сильные гидрофильные свойства. Значение  $\theta$  варьируется от  $8 \pm 3$  до  $11.3 \pm 0.6^\circ$ . При этом молекулы ПАВ являются гидрофилизующим агентом. Переход от чистой подложки к фоновому образцу без наночастиц приводит к резкому снижению параметра  $\theta$  с  $49 \pm 2$  до  $7 \pm 2^\circ$ . Данный факт свидетельствует о преобладающей ориентации гидрофильных молекул АОТ полярными группами к границе межфазного контакта твердое тело/газ [29].

**Рис. 9.** Смачиваемость (а) подложки, (б) фонового образца, а также пленок на основе (в) 10, (г) 20, (д) 30 и (е) 50 мкл золь серебра. Тестовая жидкость: дистиллированная вода.

Отметим, что серебро, в виду низкой концентрации в пленке (Табл. 4), а также большого значения толщины конечного покрытия (Рис. 5), слабо влияет на ориентацию молекул стабилизатора. Разница в параметрах  $\theta$  для всех пленок находится в пределах погрешности (Рис. 9). Вместе с тем рост шероховатости с увеличением объема органозоля (Табл. 2) может оказывать дополнительный гидрофилизующий эффект в условиях гомогенного смачивания поверхности образца [46].

#### *Механические свойства пленок*

Результаты сравнительных исследований с помощью силовой спектроскопии показывают, что механические свойства пленок во многом зависят от объема наносимого

золя (Рис. 10, Табл. 6). Исходная подложка проявляет слабые адгезионные свойства, а также демонстрирует наличие высокой механической жесткости. Значения  $W_a$  и  $E$  составляют  $5.2 \pm 0.5$  мДж/м<sup>2</sup> и  $271 \pm 7$  кПа соответственно. Осаждение золя приводит к формированию образцов с сильной адгезией и более низким значением модуля упругости.

**Рис. 10.** Силовые кривые (1) подвода и (2) отвода АСМ-зонда к поверхности (а) подложки, (б) фонового образца, а также пленок на основе (в) 10, (г) 20, (д) 30 и (е) 50 мкл золя серебра.

Таблица 6. Значения работы адгезии и модуля Юнга

Образец	V, мкл	$W_a$ , мДж/м <sup>2</sup>	$E$ , кПа
Подложка	–	$5.2 \pm 0.5$	$271 \pm 7$
Фон	–	$37 \pm 1$	$9.0 \pm 0.8$
Пленка	10	$14.5 \pm 0.9$	$131 \pm 8$
	20	$16 \pm 1$	$122 \pm 8$
	30	$17 \pm 1$	$79 \pm 7$
	50	$18.0 \pm 0.9$	$24.2 \pm 0.5$

Данные изменения подтверждают ранее сделанные выводы о химической структуре исследуемых пленок. Высокая адгезия образцов к измерительному АСМ-зонду связана с преобладанием сильных взаимодействий полярных групп ПАВ на поверхности. Значение  $W_a$  монотонно повышается с ростом объема золя и достигает  $18.0 \pm 0.9$  мДж/м<sup>2</sup>. В свою очередь, снижение механической жесткости во многом обусловлено высоким содержанием АОТ в полученных композитах (Табл. 4). При этом наличие дополнительной фазы в виде наночастиц серебра приводит к значительным изменениям. Модуль Юнга для пленки на

основе 10 мкл золя более чем в 10 раз превышает аналогичный параметр для фонового образца и далее стремительно снижается по мере увеличения значения толщины  $h_z$  (Табл. 6, Рис. 5).

В целом низкие значения параметра  $E$  указывают на наличие слабых когезионных взаимодействий внутри пленок. На примере одной из исследуемых систем показано, что образец сохраняет свою стабильность при хранении в эксикаторе в присутствии кислорода не менее 6 месяцев (Рис. 11а). Крупных дефектов на поверхности не выявлено при этом параметры морфологии и шероховатости отличаются в пределах статистической погрешности от значений соответствующих параметров свежеполученного композита (Табл. 2). Тем не менее, механическое воздействие скальпелем приводит к деформации покрытия (Рис. 11б). Погружение образца в дистиллированную воду способствует его полному разрушению в результате редиспергирования (Рис. 11в).

**Рис. 11.** Пленки на основе 50 мкл золя (сканы АСМ и снимки оптической микроскопии): данные образцов (а) после шести месяцев хранения, (б) сцарапывания скальпелем и (в) частичного погружения в дистиллированную воду.

Отметим, что результаты расчетов  $W_a$  и  $E$  (Табл. 4) сопоставимы с литературными значениями соответствующих параметров покрытий на основе зольей других материалов [47]. При этом погрешность рассчитанных параметров не превышает 10% от их абсолютных значений. Этот факт косвенно указывает на равномерный характер распределения наночастиц внутри органического слоя стабилизатора, а также замедление коагуляционных процессов с их участием при формировании композитов.

*Оптические свойства пленок*

Между тем, равномерное распределение частиц серебра при сохранении их дисперсности является благоприятным условием для формирования пленок, обладающих плазмонными свойствами. Установлено, что исследуемые образцы демонстрируют ППР сигнал (Рис. 12), интенсивность которого меняется с ростом объема наносимого золя. Данный факт главным образом обусловлен повышением рассеивающей способности образцов вследствие увеличения их толщины (Рис. 5). Нелинейный характер изменения интенсивности сигнала, а также рост уровня базовой линии спектров свидетельствуют об этом. При этом наблюдается гипсохромный сдвиг длины волны максимума поглощения (с 430 до 424 нм). Осаждение золя не приводит к появлению дополнительных полос плазмонного поглощения в области спектра (Рис. 12), что свидетельствует об отсутствии делокализации плазмонов.

**Рис. 12.** Спектры поглощения пленок на основе (1) 10, (2) 20, (3) 30 и (4) 50 мкл золя серебра.

Предложенный подход является универсальным и может быть существенно расширен для формирования аналогичных органоцольных покрытий, обладающих не только оптическими, но и дополнительными функциональными свойствами (Рис. 13). Последовательное нанесение органоцолей золота и оксида железа (III) при аналогичных экспериментальных условиях также позволяет получать шероховатые, однородные пленки. Образец с золотом демонстрирует наличие ППР сигнала. При этом максимум поглощения смещается в сторону красной области спектра и составляет ~519 нм. Пленка на основе золя оксида железа (III) не обладает плазмонным поглощением, однако проявляет магнитные свойства. Результаты картирования показывают наличие магнитного отклика с локализацией магнитных доменов. Отсутствие «ряби» и прочих артефактов в области

картирования указывает на наличие слабых магнитных взаимодействий между измерительным АСМ-зондом и поверхностью образца вследствие инкапсуляции частиц оксида железа (III) в органический слой стабилизатора [48, 49].

**Рис. 13.** (а) Данные пленки на основе 50 мкл органозоля золота: 3D АСМ-скан, профиль и спектр поглощения; (б) данные пленки на основе 50 мкл золя оксида железа (III): 3D АСМ-скан, профиль и карта распределения магнитных доменов. На 3D-сканах пунктиром отмечен участок записи профиля, стрелкой указано направление сканирования.

Тем не менее, представленная методика имеет ряд ограничений и на данном этапе не может быть задействована для широкого применения. Критический анализ полученных данных показывает, что достигнутые значения интенсивности ППР сигнала являются довольно низкими (Рис. 12 и 13а) и не превышают аналогичные показатели других композитов на основе наночастиц [3, 4, 22, 47]. Возможно несколько способов решения данной проблемы.

1. Снижение скорости вращения подложки для формирования будущего композита. Данная процедура позволит снизить потери органозоля при вращении за счет центробежных сил. На данном этапе весовой метод показывает, что при вращении потери золя составляют ~20–30%. Уменьшение потерь даст возможность повысить концентрацию источников плазмонов на подложке и, тем самым, увеличить интенсивность ППР сигнала. Тем не менее, понижения угловой скорости, может привести к интенсификации эффекта «кофейных колец», что негативно скажется на качестве будущей пленки [31].

2. Повышение концентрации источников плазмона за счет нанесения более концентрированного золя. Предварительная стадия концентрирования частиц с помощью подходов ультрацентрифугирования [50], экстракции [21] и неводного электрофореза [30,

51] также позволят увеличить интенсивность ППР сигнала. Однако в этом случае требуется тщательная оптимизация условий концентрирования, поскольку применение концентратов наночастиц в методе spin-coating не всегда представляется возможным вследствие резкого изменения вязкости (например, перехода от органоzeлей к органоzeлям [52]), а также активации процесса коагуляции наночастиц [31].

Вместе с тем потенциал практического применения исследуемых пленок в оптических сенсорах с ППР сигналом пока весьма ограничен. Источники плазмонного поглощения в образцах находятся под слоем стабилизатора (Рис. 3в–3е и 4), а значит, не могут напрямую взаимодействовать с молекулами аналита. Данная проблема в перспективе может быть решена путем удаления верхних слоев АОТ с помощью подходов лазерного и химического травления [21, 53, 54], а также термической обработки [54, 55]. Тем не менее, и в таком случае полученные пленки смогут быть использованы в основном для определения аналитов в пробах воздуха и т.п., поскольку покрытия будут полностью разрушаться при контакте с жидкими средами в силу слабой когезии (Рис. 11в). В данном случае применение пленок может быть ограничено их использованием в качестве расходных материалов в оптических датчиках контроля уровня жидкости. Для оценки такой возможности нами были проведены демонстрационные эксперименты (Рис. 14), показывающие, что последовательное увеличение уровня дистиллированной воды выше критического уровня, соответствующего нижней границе образца, приводит к редиспергированию наночастиц серебра в жидкую среду с появлением характерного ППР сигнала.

**Рис. 14.** (а) Спектры поглощения дистиллированной воды (1) до и (2) после контакта с пленкой на основе 50 мкл золя. (б) Фотографии стеклянной кюветы, к боковой стенке

которой закреплен образец для редиспергирования: вода (1) ниже, (2) на и (3) выше уровня края подложки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование органофильных покрытий методом spin-coating является хорошим решением при «плазмонизации» поверхности различных материалов, поскольку обеспечивает ряд преимуществ, в сравнении с имеющимися способами получения плёночных покрытий.

- Возможность минимизации эффекта «кофейных колец» за счёт оптимизации скорости вращения подложки.
- Равномерное распределение источников плазмона на поверхности при сохранении их дисперсности благодаря применению органофила в качестве основы.
- Возможность варьирования поверхностных и оптических свойств конечной пленки путем изменения объема наносимого золя.
- Подход является универсальным и может быть адаптирован под органофили других материалов.

Благодаря наличию сильных гидрофильных свойств, слабой механической жесткости, а также возникновению стабильного сигнала ПППР полученные композитные плёночные покрытия могут представлять практический интерес в качестве расходных материалов в оптических датчиках контроля уровня жидкости.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-73-00200.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации.

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jain P., Arun P.* Localized surface plasmon resonance in SnS:Ag nano-composite films // *J. Appl. Phys.* 2014. V. 115. P. 204512.  
<https://doi.org/10.1063/1.4880317>
2. *Mahmudin L., Suharyadi E., Utomo A.B.S., et al.* Optical properties of silver nanoparticles for surface plasmon resonance (SPR)-based biosensor applications // *Journal of Modern Physics.* 2015. V. 6. № 8. P. 1071–1076.  
<https://doi.org/10.4236/jmp.2015.68111>
3. *Merkl P., Zhou S., Zaganiaris A., et al.* Plasmonic coupling in silver nanoparticle aggregates and their polymer composite films for near-infrared photothermal biofilm eradication // *ACS Appl. Nano Mater.* 2021. V. 4. № 5. P. 5330–5339.  
<https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00668>
4. *Wang L.D., Zhang T., Zhang X.Y., et al.* Optical properties of Ag nanoparticle-polymer composite film based on two-dimensional Au nanoparticle array film // *Nanoscale Res Lett.* 2014. V. 9. P. 155.  
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-155>
5. *da Silva A.L.C.M., Gutierrez M.G., Thesing A., et al.* SPR biosensors based on gold and silver nanoparticle multilayer films // *Journal of the Brazilian Chemical Society.* 2014. V. 25. № 5. P. 928.  
<https://doi.org/10.5935/0103-5053.20140064>
6. *Babu R.S., Colenso H.R., Gouws G.J., et al.* Performance enhancement of an Ag-Au bimetallic SPR sensor: A theoretical and experimental study // *IEEE Sensors Journal.* 2023. V. 23. № 10. P. 10420–10428.  
<https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3265896>

7. *Ravindran N., Kumar S., M Y., et al.* Recent advances in surface plasmon resonance (SPR) biosensors for food analysis: A review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. V. 63. № 8. P. 1055–1077.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1958745>
8. *Zain H.A., Batumalay M., Harith Z., et al.* Surface plasmon resonance sensor for food safety // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. V. 2411. P. 012023.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2411/1/012023>
9. *Rebe Raz S., Leontaridou M., Bremer M.G.E.G., et al.* Development of surface plasmon resonance-based sensor for detection of silver nanoparticles in food and the environment // *Anal Bioanal Chem*. 2012. V. 403. P. 2843–2850.  
<https://doi.org/10.1007/s00216-012-5920-z>
10. *Balbinot S., Srivastav A.M., Vidic J., et al.* Plasmonic biosensors for food control // *Trends in Food Science and Technology*. 2021. V. 111. P. 128–140.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.057>
11. *Libánská A., Špringer T., Peštová L., et al.* Using surface plasmon resonance, capillary electrophoresis and diffusion-ordered NMR spectroscopy to study drug release kinetics // *Communications Chemistry*. 2023. V. 6. № 1. P 180.  
<https://doi.org/10.1038/s42004-023-00992-5>
12. *Olaru A., Bala C., Jaffrezic-Renault N., et al.* Surface plasmon resonance (SPR) biosensors in pharmaceutical analysis // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2015. V. 45. № 2. P. 97–105.  
<https://doi.org/10.1080/10408347.2014.881250>
13. *Jouyban A., Rahimpour E.* Optical sensors based on silver nanoparticles for determination of pharmaceuticals: An overview of advances in the last decade // *Talanta*. 2020. V. 217. P. 121071.

<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121071>

14. *Krishna K., Sangappa Y.* Silver nanoparticles-loaded polyvinyl alcohol nanocomposite film strips for environmental mercury detection application // *Inorganic Chemistry Communications*. 2025. V. 175. P. 114138.

<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114138>

15. *Amirjani A., Haghshenas D.F.* Ag nanostructures as the surface plasmon resonance (SPR)-based sensors: A mechanistic study with an emphasis on heavy metallic ions detection // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2018. V. 273. P. 1768–1779.

<https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.07.089>

16. *Sayed F.A., Elsayed H.A., Al-Dossari M., et al.* Angular surface plasmon resonance-based sensor with a silver nanocomposite layer for effective water pollution detection // *Sci Rep*. 2023. V. 13. P. 21793.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-48837-4>

17. *Del Rosso T., Zaman Q., Romani E.C., et al.* Enhanced stability of plasmonic metal thin films by CVD grown graphene transfer // *Thin Solid Films*. 2017. V. 644. P. 65–70.

<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.06.061>

18. *Nur-E-Alam M., Yap B.K., Basher M.K., et al.* Multifunctional prospects of physical vapor-deposited silver-based metal-dielectric nanocomposite thin films // *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2025. V. 10. № 2. P. 100871.

<https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2025.100871>

19. *Kadam P., Bhujbal P.K., Dhirhe D., et al.* Room temperature synthesis of silver thin films using an M-CBD method for surface-enhanced Raman scattering // *ES General*. 2026. V. 11. P. 1580.

<https://doi.org/10.30919/esg1580>

20. *Boehm J., François A., Ebendorff-Heidepriem H., et al.* Chemical deposition of silver for the fabrication of surface plasmon microstructured optical fibre sensors // *Plasmonics*. 2011. V. 6. P. 133–136.  
<https://doi.org/10.1007/s11468-010-9178-z>
21. *Воробьев С.А., Флерко М.Ю., Новикова С.А., Мазурова Е.В., Томашевич Е.В., Лихацкий М.Н., Сайкова С.В., Самойло А.С., Золотовский Н.А., Волочаев М.Н.* Синтез и исследование сверхконцентрированных органонозелей наночастиц серебра // *Коллоидный журнал*. 2024. Т. 86. № 2. С. 193–203. <https://doi.org/10.31857/S0023291224020047> [*Vorobyev S.A., Flerko M.Y., Novikova S.A., et al.* Synthesis and study of superhigh-concentrated organosols of silver nanoparticles // *Colloid Journal*. 2024. V. 86. № 2. P. 208–217. <https://doi.org/10.1134/S1061933X23601294>]
22. *Бочаров В.В., Суляева В.С., Колодин А.Н.* Оптически активные пленки на основе органонозеля серебра, стабилизированного АОТ // *Коллоидный журнал*. 2025. Т. 87. № 3. С. 173–186. <https://doi.org/10.31857/S0023291225030015> [*Bocharov V.V., Sulyaeva V.S., Kolodin A.N.* Optically active films based on AOT-stabilized silver organosol // *Colloid Journal*. 2025. V. 87. № 3. P. 327–339. <https://doi.org/10.1134/S1061933X25600149>]
23. *Ahn K., Kim D., Kim O., et al.* Analysis of transparent conductive silver nanowire films from dip coating flow // *J. Coat. Technol. Res.* 2015. V. 12. P. 855–862.  
<https://doi.org/10.1007/s11998-015-9690-3>
24. *Mulus D.A.S., Permana M.D., Prawiranegara S.P.H., et al.* Enhanced performance of spin-coated silver-modified titanium dioxide thin films over dip coating method for metformin photodegradation // *Results in Optics*. 2025. V. 21. P. 100838.  
<https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100838>
25. *Baba A., Imazu K., Yoshida A., et al.* Surface plasmon resonance properties of silver nanoparticle 2D sheets on metal gratings // *SpringerPlus*. 2014. V. 3. P. 284.

<https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-284>

26. *da Rocha Rodrigues R., Silva Pellosi D., Caseli L., et al.* Langmuir–Blodgett films of conjugated polymer and silver nanoparticles: A possible substrate for pesticide SERS-based detection // *Langmuir*. 2025. V. 41. № 37. P. 25729–25741.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c03648>

27. *Gu W., Li Q., Wang R., et al.* Recent progress in the applications of Langmuir–Blodgett film technology // *Nanomaterials*. 2024. V. 14. № 12. P. 1039.

<https://doi.org/10.3390/nano14121039>

28. *Kolodin A.N.* Hydrophilization and plasmonization of polystyrene substrate with Au nanoparticle organosol // *Surfaces and Interfaces*. 2022. V. 34. P. 102327.

<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102327>

29. *Богданова Ю.Г., Должикова В.Д.* Метод смачивания в физико-химических исследованиях поверхностных свойств твердых тел // *Структура и динамика молекулярных систем*. 2008. Т. 2. № 4-А. С. 124–133.

30. *Bulavchenko A.I., Arymbaeva A.T., Demidova M.G., et al.* Synthesis and concentration of organosols of silver nanoparticles stabilized by AOT: Emulsion versus microemulsion // *Langmuir*. 2018. V. 34. № 8. P. 2815–2822.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b04071>

31. *Shaparenko N.O., Demidova M.G., Kompan'kov N.B., et al.* Aqueous solutions of AOT as a dispersion medium for stabilization of SiO<sub>2</sub> nanoparticles // *Journal of Molecular Liquids*. 2021. V. 343. P. 117591.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117591>

32. *Sulyaeva V.S., Kosinova M.L., Rumyantsev Yu.M., et al.* PECVD synthesis and optical properties of BC<sub>x</sub>N<sub>y</sub> films obtained from N-triethylborazine as a single-source precursor // *Surface & Coatings Technology*. 2013. V. 230. P. 145–151.

<http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.06.018>

33. ГОСТ 4287. *Геометрические характеристики изделий (GPS): Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности*. Москва: Стандартинформ. 2015. 20 с.

34. *Derjaguin B.V., Müller V.M., Toporov Y.P.* Effect of contact deformations on the adhesion of particles // *J. Colloid Interface Sci.* 1975. V. 53. № 2. P. 314–326.

[https://doi.org/10.1016/0021-9797\(75\)90018-1](https://doi.org/10.1016/0021-9797(75)90018-1)

35. *Hertz H.* On the contact of elastic solids // *J. Reine Angew Math.* 1882. V. 92. P. 156–171.

36. CasaXPS Software. <http://www.casaxps.com> (дата обращения 14 декабря 2025).

37. *Поповецкий П.С., Булавченко А.И., Арымбаева А.Т., Булавченко О.А., Петрова Н.И.* Синтез и электрофоретическое концентрирование Ag–Cu наночастиц типа ядро–оболочка в микроэмульсии АОТ в *n*-декане // *Журнал Физической Химии*. 2019. Т. 93. № 8. С. 1237–1242. <https://doi.org/10.1134/s0044453719080235> [*Popovetskiy P.S., Bulavchenko A.I., Arymbaeva A.T., et al.* Synthesis and electrophoretic concentration of Ag–Cu nanoparticles of the core–shell type in an AOT microemulsion in *n*-decane // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2019. V. 93. № 8. P. 1572–1576. <https://doi.org/10.1134/S0036024419080235>]

38. *Bulavchenko A.I., Popovetskiy P.S.* Structure of adsorption layer of silver nanoparticles in sodium bis(2-ethylhexyl) sulfosuccinate solutions in *n*-decane as observed by photon-correlation spectroscopy and nonaqueous electrophoresis // *Langmuir*. 2014. V. 30. P. 12729–12735.

<https://doi.org/10.1021/la5004935>

39. *Rajesh Kumar B., Subba Rao T.* AFM studies on surface morphology, topography and texture of nanostructured zinc aluminum oxide thin films // Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. 2012. V. 7. № 4. P. 1881–1889.
40. ГОСТ 2789-73. *Межгосударственный стандарт «Шероховатость поверхности». Параметры и характеристики.* М.: ИУС 7-80. 1990.
41. *Rao A., Schoenenberger M., Gnecco E., et al.* Characterization of nanoparticles using atomic force microscopy // J. Phys.: Conf. Ser. 2007. V. 61. P. 971–976.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/61/1/192>
42. *Циркунова Н.Г., Кухаренко Л.В. Чижик С.А., Борисенко В.Е.* Артефакты измерений, вносимые зондом атомного силового микроскопа в процессе сканирования // Доклады БГУИР. 2008. Т. 3. № 33. С. 71–75.
43. *Ward H.C.* Rough Surfaces. London: Longman. 1982.
44. NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) Database, Version 3.5.  
<https://srdata.nist.gov/xps/> (дата обращения 14 декабря 2025).
45. XPS, AES, UPS and ESCA Database.  
<http://www.lasurface.com/database/elementxps.php> (дата обращения 14 декабря 2025).
46. *Wenzel R.N.* Resistance of solid surfaces to wetting by water // Ind. Eng. Chem. 1936. V. 28. P. 988–994.  
<https://doi.org/10.1021/ie50320a024>
47. *Kolodin A.N., Syrokvashin M.M., Korotaev E.V.* Gold nanoparticle microemulsion films with tunable surface plasmon resonance signal // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2024. V. 701. P. 134904.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134904>
48. *Yang S., Gao J., Xiang J., et al.* Process and characteristics of cobalt films deposited by thermal atomic layer deposition and silicide film formed // Vacuum. 2025. V. 240. P. 114457.

<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114457>

49. *Hsieh C.T., Liu J.Q., Lue J.T.* Magnetic force microscopy studies of domain walls in nickel and cobalt films // *Applied Surface Science*. 2005. V. 252. № 5. P. 1899–1909.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.05.041>

50. *Полеева Е.В., Арымбаева А.Т., Булавченко А.И.* Варьирование поверхностного заряда наночастиц золота в мицеллярных системах Span 80, AOT и Span 80 + AOT в *n*-декане // *Журнал физической химии*. 2020. Т. 94. № 11. С. 1664–1671.

<https://doi.org/10.31857/s0044453720110278> [*Poleeva E.V., Arymbaeva A.T., Bulavchenko A.I.* Varying the surface charges of gold nanoparticles in Span 80, AOT, and Span 80 + AOT micellar systems in *n*-decane // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020. V. 94, № 11. P. 2291–2298. <https://doi.org/10.1134/S0036024420110278>]

51. *Popovetskiy P.S., Chubar V.S., Sulyaeva V.S.* Highly conductive porous coatings based on gold organosols stabilized with the non-ionic biodegradable surfactant Ecosurf SA4 // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. V. 726. P. 138109.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138109>

52. *Подлипская Т.Ю., Шапаренко Н.О., Булавченко А.И.* Формирование покрытий SiO<sub>2</sub>@NPs (NPs = Ag, Au, CdS) из декановых органогелей на предметных стеклах в присутствии AOT // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2024. Т. 60. № 1. С. 47–56.

<https://doi.org/10.31857/S0044185624010051> [*Podlipskaya T.Y., Shaparenko N.O., Bulavchenko A.I.* Formation of SiO<sub>2</sub>@NPs (NPs = Ag, Au, CdS) coatings on slides from decane organogels in the presence of AOT // *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.* 2024. V. 60. № 3. P. 409–417. <https://doi.org/10.1134/S2070205124701892>]

53. *Поповецкий П.С., Арымбаева А.Т., Бордзиловский Д.С., Майоров А.П., Максимовский Е.А., Булавченко А.И.* Синтез и электрофоретическое концентрирование наночастиц серебра в обратных эмульсиях бис(2-этилгексил)сульфосукцината натрия и

получение на их основе проводящих покрытий методом селективного лазерного спекания // Коллоидный журнал. 2019. Т. 81. № 4. С. 501–507. <https://doi.org/10.1134/s0023291219040116> [*Popovetskiy P.S., Arymbaeva A.T., Bordzilovskiy D.S. et al.* Synthesis and electrophoretic concentration of silver nanoparticles in water-in-oil emulsions of sodium bis(2-ethylhexyl) sulfosuccinate and preparation of conductive from them coatings by selective laser sintering // *Colloid Journal*. 2019. V. 81 № 4. P. 439–445. <https://doi.org/10.1134/S1061933X19040112>]

54. Булавченко А.И., Демидова М.Г., Поповецкий П.С., Подлипская Т.Ю., Плюсин П.Е. Отделение избытка ПАВ от наночастиц серебра и золота в мицеллярных концентратах методом неводного электрофореза // Журнал Физической Химии. 2017. Т. 91. №. 8. С. 1344–1352. <https://doi.org/10.7868/s0044453717080088> [*Bulavchenko A.I., Demidova M.G., Popovetskiy P.S., et al.* Separating excess surfactant from silver and gold nanoparticles in micellar concentrates by means of nonaqueous electrophoresis // *Russ. J. Phys. Chem.* 2017. V. 91. № 8. P. 1493–1501. <https://doi.org/10.1134/S0036024417080076>]

55. Булавченко А.И., Поповецкий П.С., Максимовский Е.А. Свойства проводящих пленок из электрофоретического концентрата наночастиц серебра и золота в АОТ // Журнал Физической Химии. 2013. Т. 87. № 10. С. 1779. <https://doi.org/10.7868/s0044453713100063> [*Bulavchenko A.I., Popovetskiy P.S., Maksimovskiy E.A.* Properties of conducting films of electrophoretic concentrates of silver and gold nanoparticles in AOT surfactant // *Russ. J. Phys. Chem.* 2013. V. 87 № 10. P. 1756–1761. <https://doi.org/10.1134/S0036024413100063>]

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Серебряный органозол: (а) спектр поглощения, (б) функция распределения наночастиц по гидродинамическому диаметру. Образец разбавлен *n*-деканом в 630 раз.

**Рис. 2.** Данные оптической микроскопии: снимки поверхности пленок на основе (а) 10 и (б) 50 мкл золя.

**Рис. 3.** Данные АСМ: 3D-скан (пунктиром отмечен участок записи профиля, стрелкой указано направление сканирования), профиль и функция распределения по высоте для (а) подложки, (б) фонового образца, а также пленок на основе (в) 10, (г) 20, (д) 30 и (е) 50 мкл золя серебра.

**Рис. 4.** Данные АСМ: 2D-скан (пунктиром отмечен участок записи профиля, стрелкой указано направление сканирования), профиль выступов АОТ (красной стрелкой отмечена средняя высота выступов) в пленках на основе (а) 10, (б) 20, (в) 30 и (г) 50 мкл золя серебра.

**Рис. 5.** Оценка толщины пленок на основе (а) 10 и (б) 50 мкл золя серебра. Пунктиром отмечен участок записи профиля на 2D-скане края пленки; стрелкой указано направление сканирования.

**Рис. 6.** Корреляционные зависимости высоты выступов АОТ от (а) среднего арифметического отклонения профиля и (б) среднеквадратичного отклонения профиля.

**Рис. 7.** Энергетические спектры пленок на основе (а) 10 и (б) 50 мкл золя серебра. Наличие спектральной линии Au обусловлено металлизацией поверхности пленок в процессе пробоподготовки.

**Рис. 8.** Обзорный спектр РФЭС и Ag3d-, C1s-, O1s-, S2p- и Na1s-области для пленки на основе 50 мкл золя серебра.

**Рис. 9.** Смачиваемость (а) подложки, (б) фонового образца, а также пленок на основе (в) 10, (г) 20, (д) 30 и (е) 50 мкл золя серебра. Тестовая жидкость: дистиллированная вода.

**Рис. 10.** Силовые кривые (1) подвода и (2) отвода АСМ-зонда к поверхности (а) подложки, (б) фонового образца, а также пленок на основе (в) 10, (г) 20, (д) 30 и (е) 50 мкл золя серебра.

**Рис. 11.** Пленки на основе 50 мкл золя (сканы АСМ и снимки оптической микроскопии): данные образцов (а) после шести месяцев хранения, (б) сцарапывания скальпелем и (в) частичного погружения в дистиллированную воду.

**Рис. 12.** Спектры поглощения пленок на основе (1) 10, (2) 20, (3) 30 и (4) 50 мкл золя серебра.

**Рис. 13.** (а) Данные пленки на основе 50 мкл органозоля золота: 3D АСМ-скан, профиль и спектр поглощения; (б) данные пленки на основе 50 мкл золя оксида железа (III): 3D АСМ-скан, профиль и карта распределения магнитных доменов. На 3D-сканах пунктиром отмечен участок записи профиля, стрелкой указано направление сканирования.

**Рис. 14.** (а) Спектры поглощения дистиллированной воды (1) до и (2) после контакта с пленкой на основе 50 мкл золя. (б) Фотографии стеклянной кюветы, к боковой стенке которой закреплен образец для редиспергирования: вода (1) ниже, (2) на и (3) выше уровня края подложки.

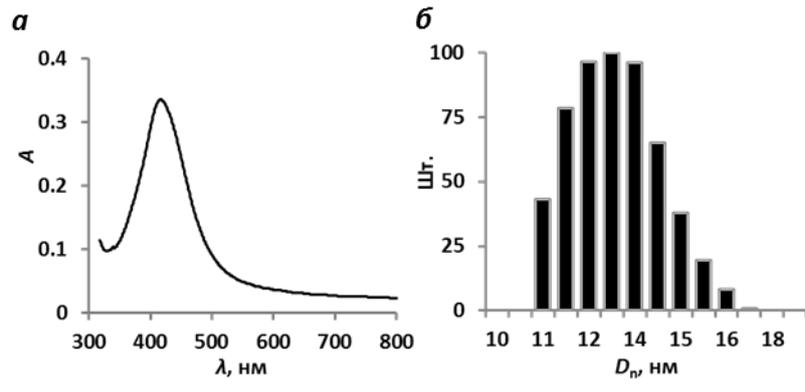


Рисунок 1. А.Н. Колодин

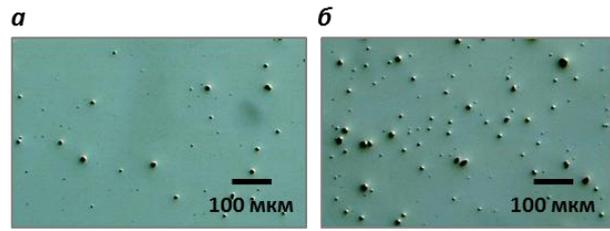


Рисунок 2. А.Н. Колодин

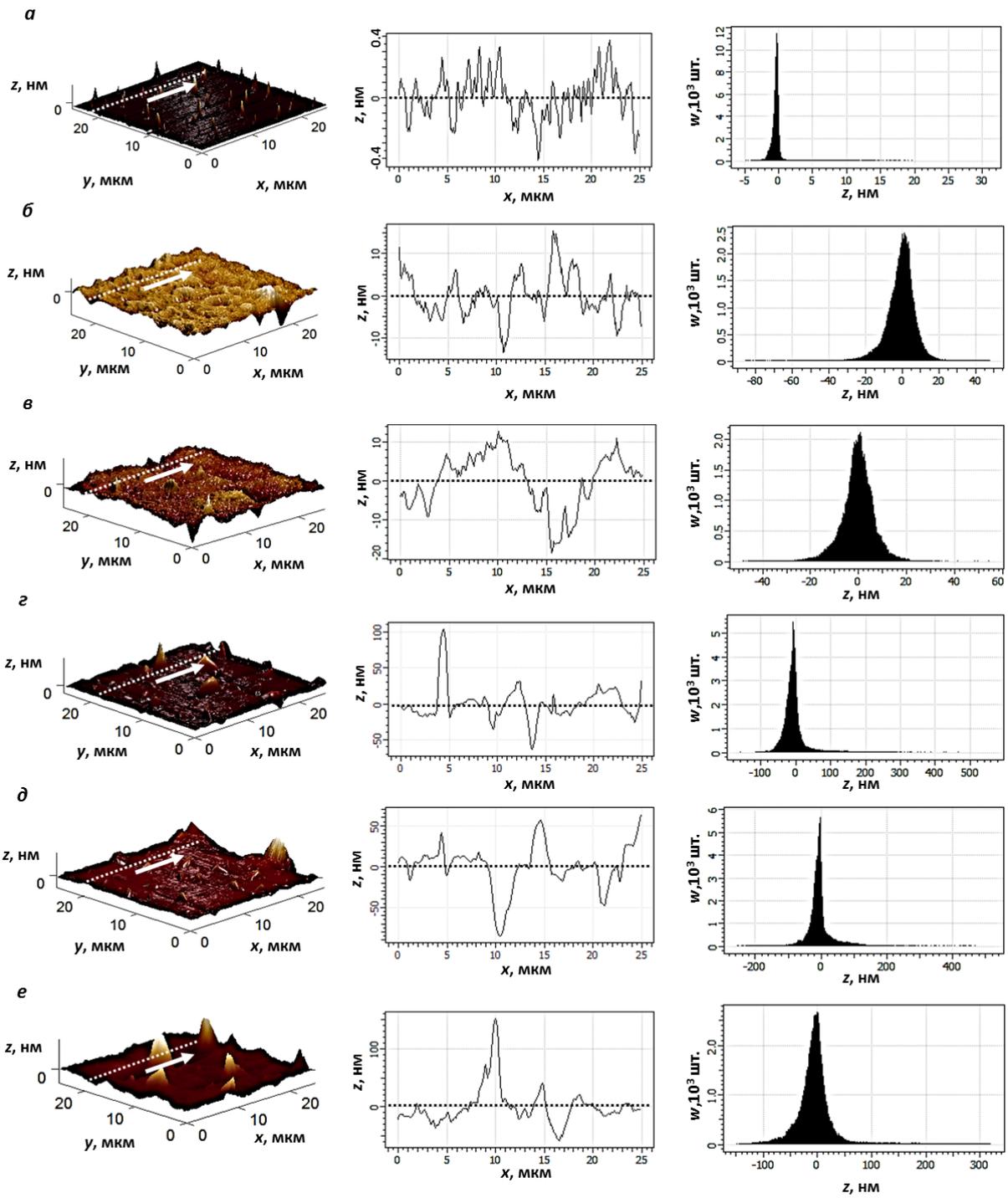


Рисунок 3. А.Н. Колодин

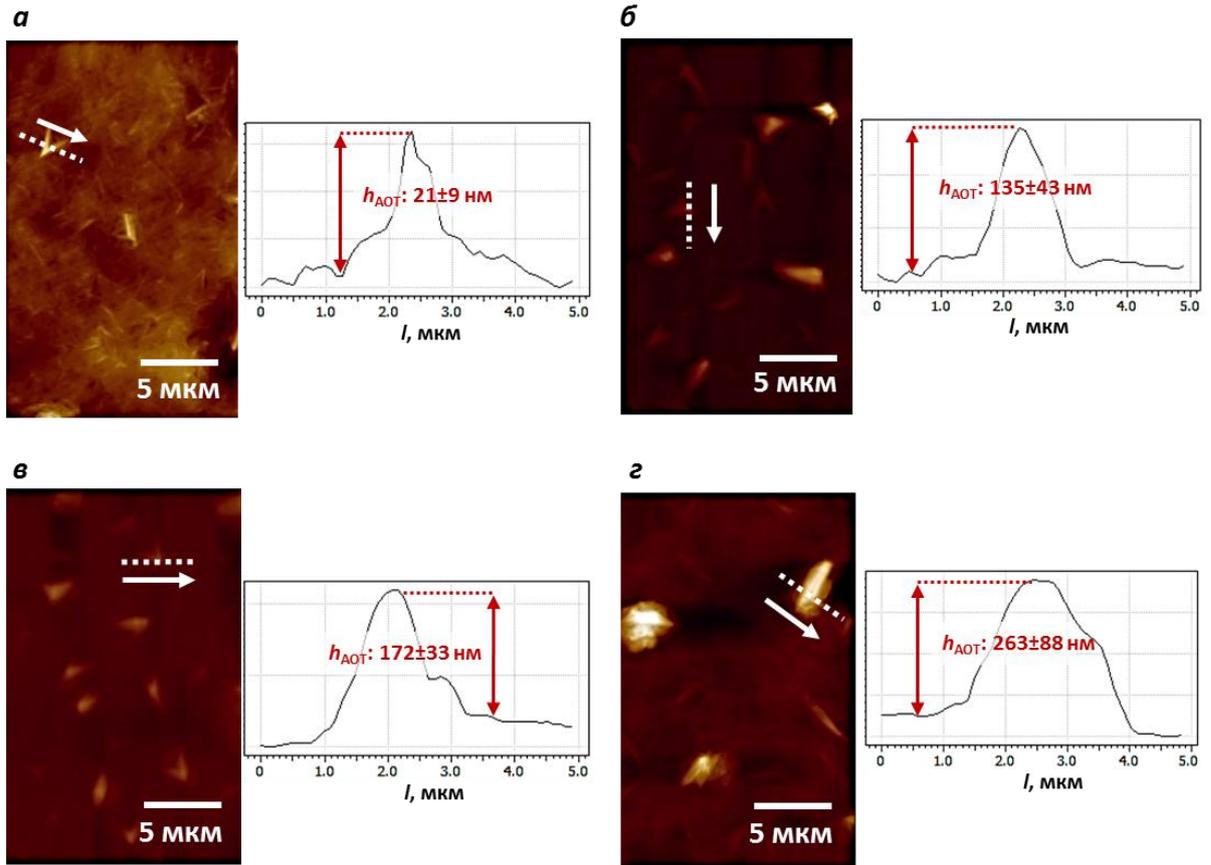


Рисунок 4. А.Н. Колодин

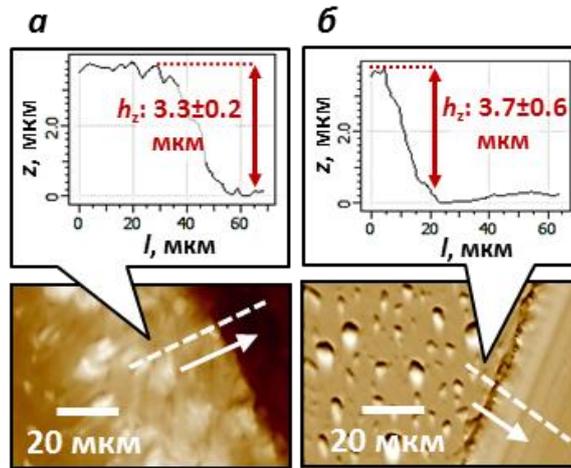


Рисунок 5. А.Н. Колодин

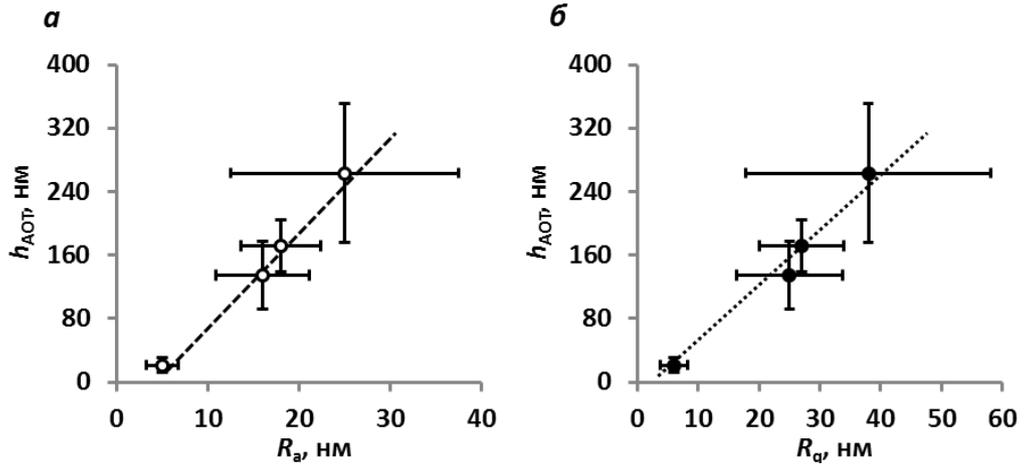


Рисунок 6. А.Н. Колодин

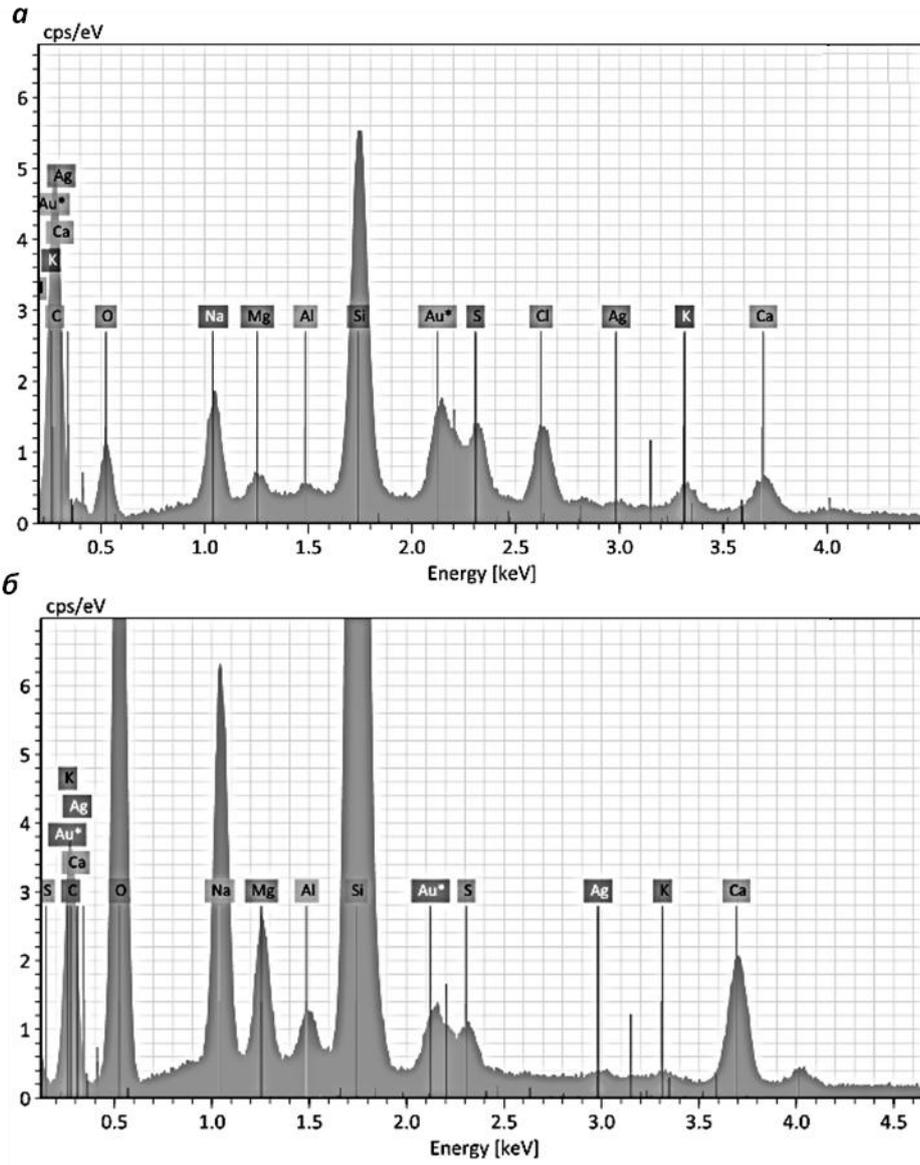


Рисунок 7. А.Н. Колодин

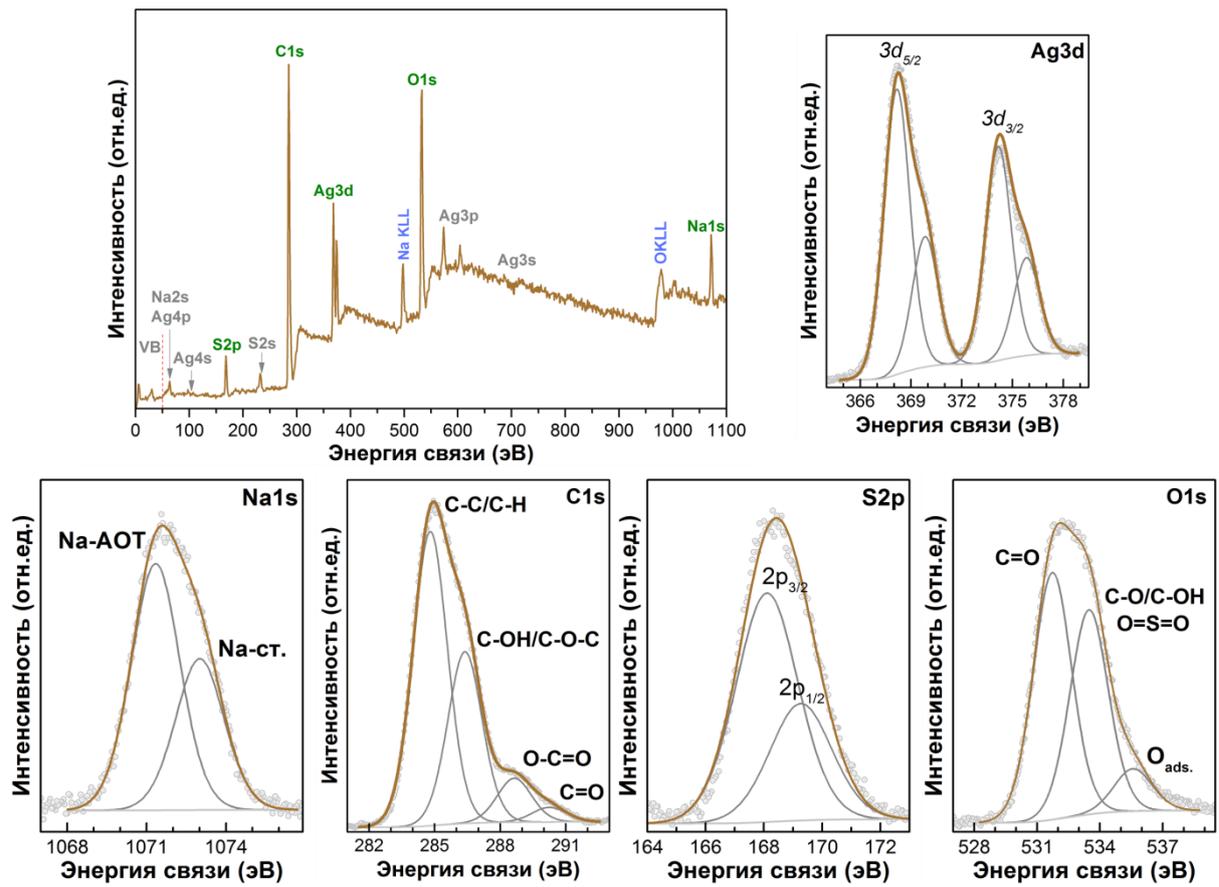


Рисунок 8. А.Н. Колодин

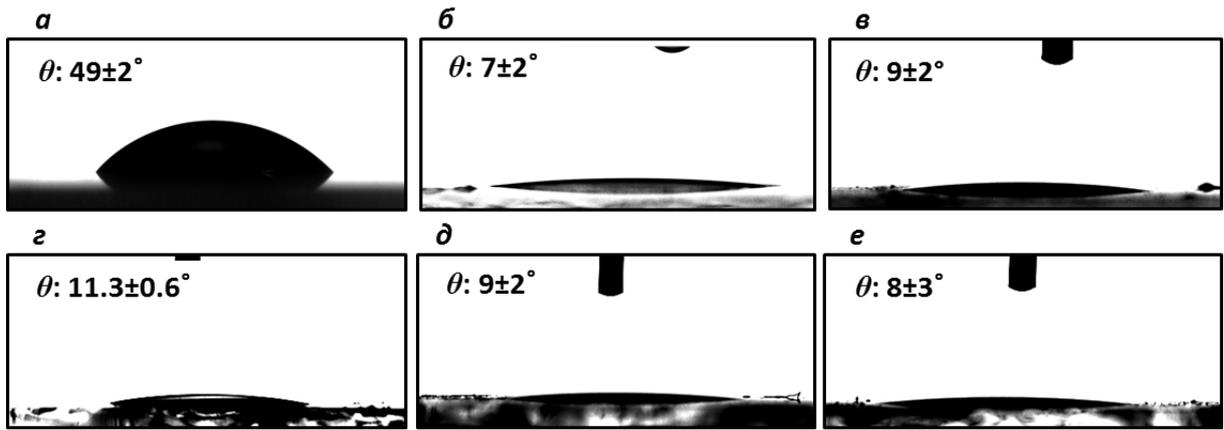


Рисунок 9. А.Н. Колодин

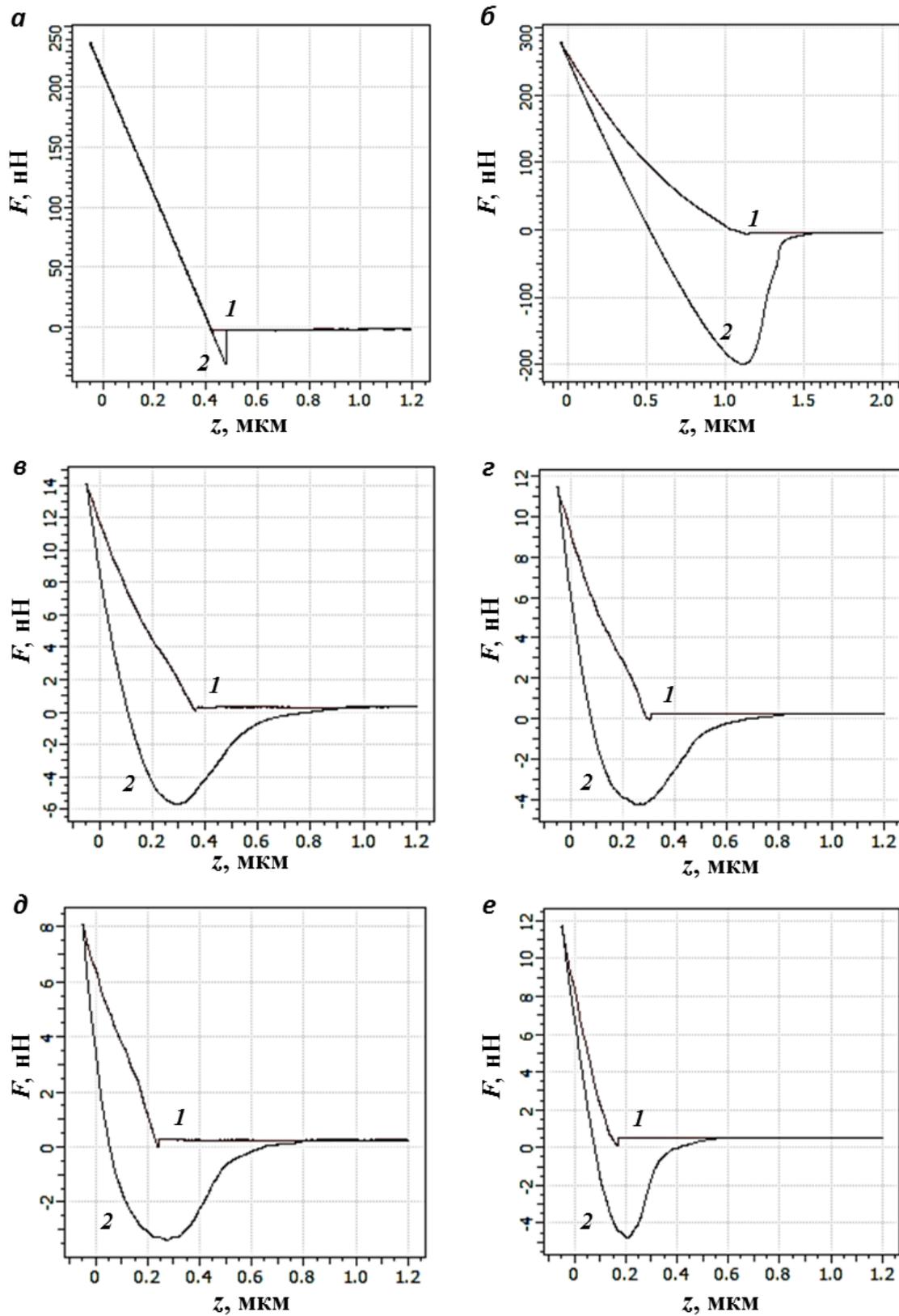


Рисунок 10. А.Н. Колодин

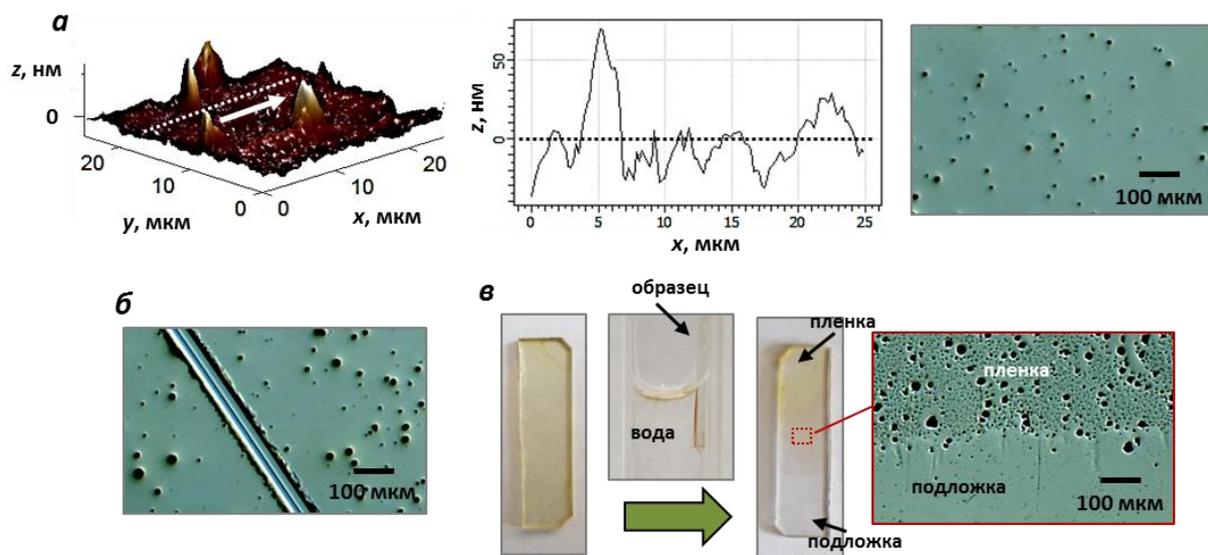


Рисунок 11. А.Н. Колодин

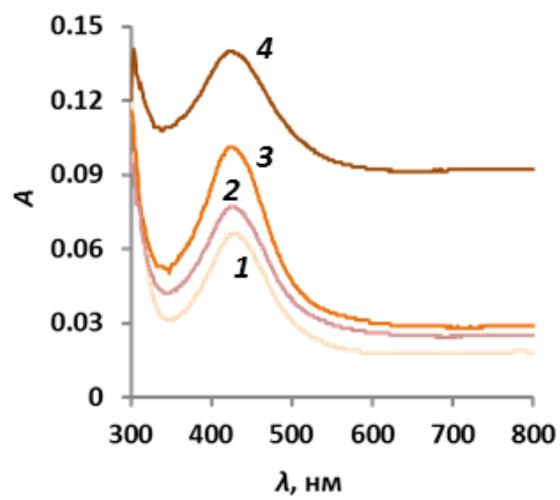


Рисунок 12. А.Н. Колодин

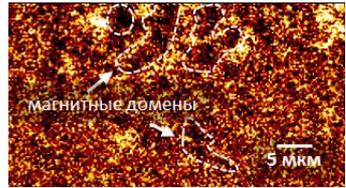
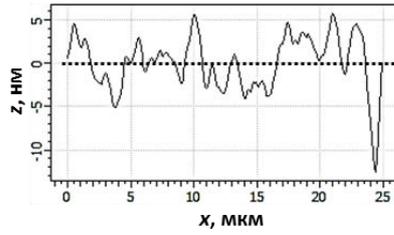
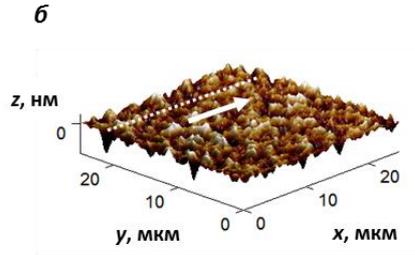
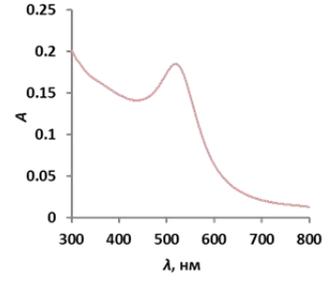
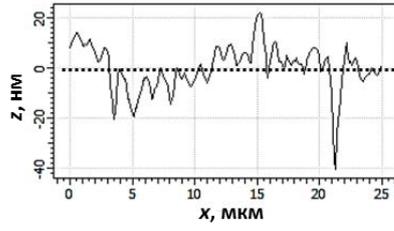
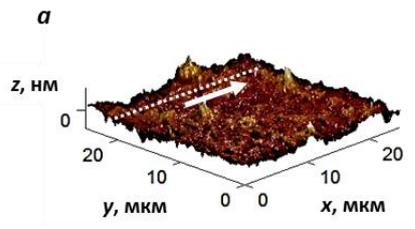


Рисунок 13. А.Н. Колодин

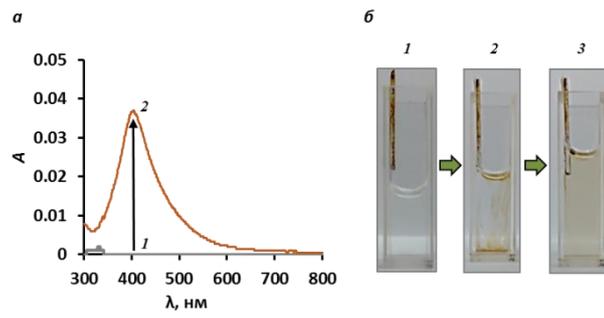


Рисунок 14. А.Н. Колодин