

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,  
НАНОСТРУКТУР  
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS  
OF THE STUDY OF CLUSTERS,  
NANOSTRUCTURES AND  
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY  
IZUČENIÂ KLASTEROV,  
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

**Официальный сайт издания в сети Интернет:**

**<https://www.physchemaspects.ru>**

**Ф50** Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

*Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*

*Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

**ПОЛУЧЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПЛАТИНЫ,  
ОБЛАДАЮЩИХ ФРАКТАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

Д.В. Иванов<sup>1</sup>, А.С. Антонов<sup>1,2</sup>, Е.М. Семенова<sup>1</sup>, А.И. Иванова<sup>1</sup>, С.А. Третьяков<sup>1</sup>,  
Н.Ю. Сдобняков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»  
170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»  
170904, Россия, Тверь, ул. Маршала Василевского, 7  
nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.073

**Аннотация:** Проведено комплексное исследование морфологии рельефа наноразмерных пленок платины на поверхности слюды с помощью сканирующего зондового (в режиме атомного-силового) и туннельного микроскопов, а также оптического интерференционного профилометра. Описаны характерные особенности нанорельефа поверхности пленок платины различной толщины, включая фрактальные свойства. Получены значения фрактальной размерности для пленок разной толщины при двух альтернативных методах исследования на разных исходных масштабах образцов: на основе данных атомного-силового микроскопа –  $\bar{D}_c = 2,28 \div 2,35$  и сканирующего туннельного микроскопа –  $\bar{D}_c = 2,12 \div 2,26$ . Для сравнения приведены экспериментальные данные других авторов. Предложены рекомендации по развитию технологии «выращивания» структур с заданной морфологией поверхности.

**Ключевые слова:** сканирующая зондовая микроскопия, режим атомно-силового микроскопа, сканирующая туннельная микроскопия, нанорельеф, параметры шероховатости, фрактальная размерность, пленки платины.

## 1. Введение

Прогресс пленочной наноэлектроники представляет собой важный пример того, как научное исследование и технология стимулируют развитие друг друга. Именно поэтому в настоящее время актуальной задачей становится комплексное исследование отдельных агломератов на поверхности металлических покрытий и их морфологических характеристик, включая фрактальные свойства [1-3]. Было показано [2, 3], что параметр фрактальной размерности может и должен использоваться в качестве эффективной характеристики развитости микро- и наноструктуры шероховатой поверхности, а величина фрактальной размерности эквивалентно заменяет целый комплекс амплитудных и шаговых характеристик шероховатости поверхности. Нами достаточно широко применяются различные методики исследования поверхности для получения и накопления статистических данных [4-6], особенно для изучения взаимосвязи физических свойств и морфологических характеристик поверхности [6-8]. Очевидно, что островковые металлические наноразмерные пленки обладают особыми свойствами, отличающимися как количественно, так и качественно от свойств

массивной фазы [9]. Технологический аспект исследования наноразмерных пленок заключается в том, что не только параметр фрактальной размерности является определяющим, но и высотные параметры пленок, которые используются для «выращивания» наноразмерных структур, обеспечивающих уникальные физико-химические свойства поверхности [10-15]. Таким образом, актуальной задачей для развития технологии искусственного формирования деталей рельефа является создание и обеспечение воспроизводимости условий для формирования наноразмерных металлических пленок с фрактальной структурой на твердых поверхностях.

Целью настоящей работы является комплексное исследование морфологии поверхности, включая фрактальную размерность, для наноразмерных по толщине пленок платины на подложке из слюды.

## **2. Экспериментальное оборудование**

Напыление платины на подложку из слюды осуществлялось на установке магнетронного напыления JEOL JFC-1600 (Япония) в плазме аргона при рабочем давлении 8 Па, значение ионного тока составляло 30 мА, напряжение 220 В, расстояние между мишенью и образцом 5 см. Продолжительность напыления одного слоя платины составила 30 секунд. Наносимые на поверхность слюды частицы платины имеют размер 1–2 нм и образуют кластерные структуры, имеющие диаметр 50–500 нм. В данной работе исследовались пленки платины, полученные по следующим схемам напыления:

1. единовременное напыление 3 слоев платины (толщина пленки 63 нм);
2. единовременное напыление 6 слоев платины (толщина пленки 135 нм);
3. два последовательных, но разделенных по времени напыления по 3 слоя платины (толщина пленки в 1 этапе – 55 нм, во 2 этапе – 140 нм).

Технология магнетронного напыления заключается в нанесении тонких плёнок на подложку с помощью катодного распыления (мишени) в плазме магнетронного разряда. Магнетронными называются системы, в которых используются неоднородные скрещенные электрическое и магнитное поля. Высокая скорость распыления, характерная для этих систем, достигается увеличением плотности ионного тока за счет локализации плазмы у распыляемой поверхности мишени с помощью сильного поперечного магнитного поля [16]. Распылённое вещество мишени, осаждаясь на подложку, формирует плотное покрытие с прогнозируемой структурой. Отметим, что ювенильная поверхность слюды позволяет создавать одинаковые условия для всей поверхности

наноразмерной металлической пленки в части появления активных центров формирования фрактальных структур. Вместе с тем не вызывает сомнений, что механизм образования фрактальных структур, в том числе механизм ассоциации [17], может существенно зависеть от состояния отдельных элементов поверхности диэлектрической подложки: морфологии рельефа (шероховатость поверхности, наличия дефектов), а также ее температуры.

Исследования топографии поверхности пленок платины были выполнены при комнатной температуре на сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) SolverNext (ООО «НТ-МДТ СИ»). В качестве зонда использовался кантилевер серии MFM10, предназначенный для измерений с высоким пространственным разрешением. Специальное защитное покрытие помогает избежать окисления и значительно увеличивает срок службы. При этом радиус закругления кантилевера остается довольно малым для получения изображений с высоким пространственным разрешением – порядка 20–30 нм. Типичное значение резонансной частоты кантилевера – 150 кГц, типичная силовая константа – 5,1 Н/м. Кантилевер имеет покрытие из алюминия с отражающей стороны для увеличения сигнала лазера. При сканировании в полуконтактном режиме (атомно-силовая микроскопия) нами регистрировался рельеф поверхности. Сканирование одного и того же участка поверхности производилось как минимум дважды в двух взаимно-перпендикулярных направлениях для того, чтобы убедиться в отсутствии искажений, связанных со скоростью сканирования. В среднем время получения одного АСМ-изображения в масштабе от  $10 \times 10$  до  $0,5 \times 0,5$  мкм составляло 10–15 мин.

Для дополнительной верификации результатов исследования топографии поверхности наноразмерных пленок платины также использовался СТМ «УМКА-02G», в частности для осуществления контроля получаемых изображений с целью исключения артефактов, масштабных несоответствий и учета влияния возможного появления оксидных пленок и т.п. Контроль качества поверхности и параметры шероховатости поверхности напыленных слоев платины, а также их толщина определялись с помощью оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000. Анализ морфологии поверхности проводился с использованием как встроенного программного обеспечения вышеперечисленных приборов, так и с использованием специализированного [18-20].

### **3. Методика определения фрактальной размерности и высотных параметров**

Введем в рассмотрение согласно [1-3, 21] кластерную размерность

$D_c$ , определяемую из соотношения

$$N = (d/a)^{D_c}, \quad (1)$$

где  $N$  – число частиц в кластере (число мономеров),  $d$  – линейный размер, т.е. диаметр кластера (агрегата),  $a$  – размер частиц, из которых состоит кластер (средний размер мономера). Использование соотношения (1) согласно методике, изложенной в [1, 3-6, 13, 21], проводилось смешанным способом (вручную и с привлечением программных продуктов [18-20]). В данной работе оценка фрактальной размерности и обработка графических материалов производилась в программном комплексе Image Analysis (версия 3.5.30.19856). Предлагаемая методика определения фрактальной размерности изложена в [19]. Отметим лишь, что фрактальная размерность поверхности, найденная как с помощью метода вложенных квадратов [1, 3-6, 13, 21], так и посредством методики [19] может отождествляться с соответствующей кластерной размерностью трехмерных агрегатов.

#### 4. Обсуждение результатов

На рис. 1 и 2 представлены результаты комплексного исследования с помощью сканирующего зондового (в режиме атомного-силового (АСМ)) и туннельного (СТМ) микроскопов. В силу особенностей методик проведения эксперимента размеры участков сканирования поверхности исследуемых образцов различны. Анализируя 3D изображения пленок, полученные в различных масштабах, можно увидеть отдельные агломераты, распределенные по поверхности и в достаточной степени равномерно. В целях оценки качества покрытия и определения типа покрытия (тип «плато», тип «высотно развитого рельефа») нами были определены морфологические характеристики поверхности образца, а именно высотные параметры (см. Таблицу 1):

- средняя арифметическая шероховатость  $S_a = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} |z(x_k, y_l)|$ ;

- среднеквадратичное отклонение  $S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^2}$ ;

- максимальная высота от пика до впадины на поверхности образца  $S_z = z_{\max} - z_{\min}$ ;

- коэффициент эксцесса – параметр, учитывающий форму функции распределения амплитуды (определяет степень изрезанности поверхности)

$$S_{ku} = \frac{1}{MN \cdot S_q^4} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^4$$

- коэффициент асимметрии – параметр, который описывает форму функции распределения амплитуды (показывает симметрию изменения

поверхности относительно ее средней линии)  $S_{sk} = \frac{1}{MN \cdot S_q^3} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [z(x_k, y_l)]^3$ .

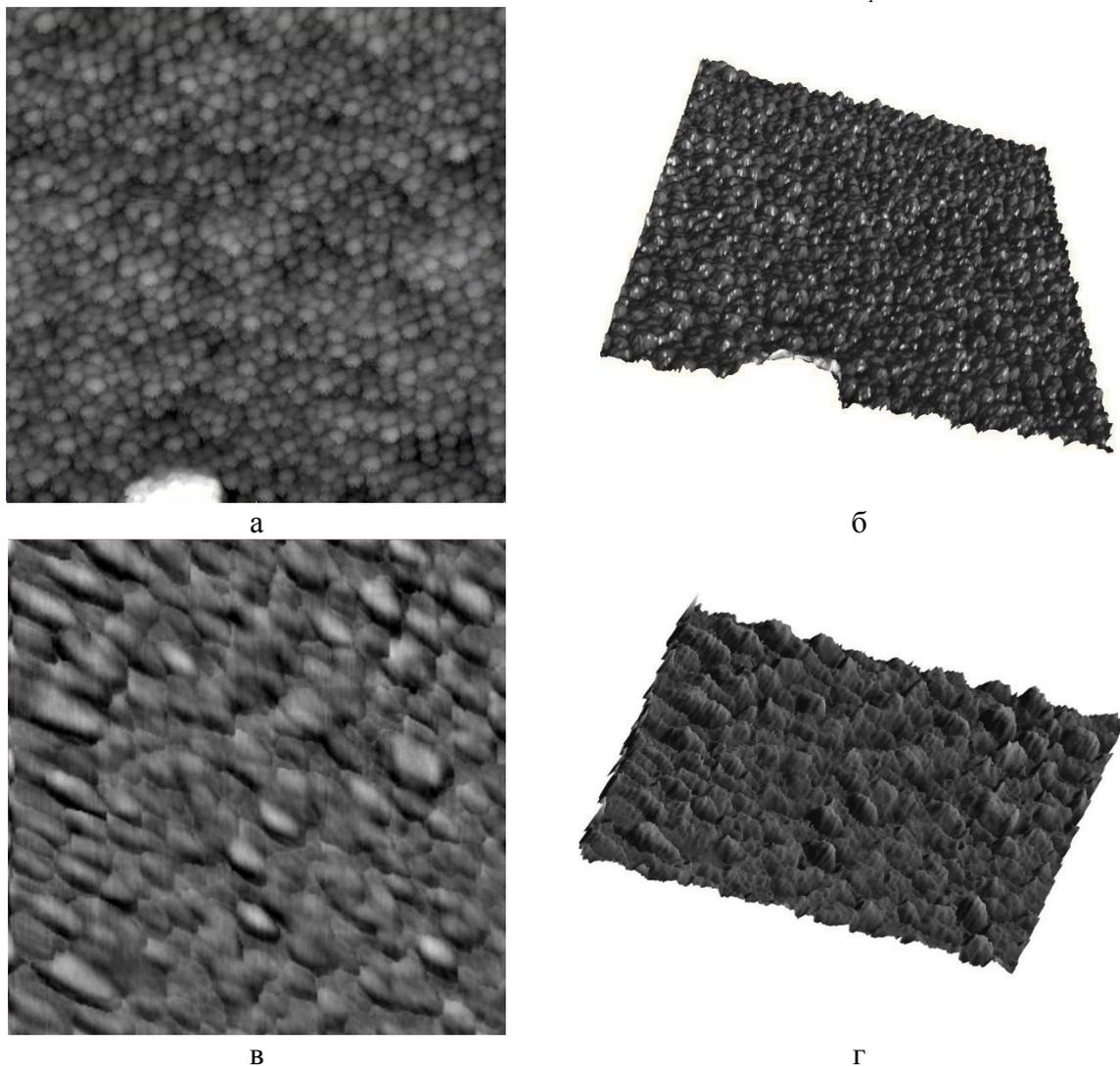


Рис. 1. Изображения поверхности платины на слюде, полученные по схеме 1: а – полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа (размер области сканирования  $250 \times 250 \text{ нм}^2$ ), б – соответствующее 3D изображение; в – полученное с помощью атомно-силового микроскопа (размер области сканирования  $4000 \times 4000 \text{ нм}^2$ ), г – соответствующее 3D изображение.

Таблица 1. Средние значения морфологических характеристик плёнок платины на слюде для различных схем напыления, полученные с использованием оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000. Фрактальная размерность определена в программном комплексе Image Analysis (версия 3.5.30.19856).

Тип напыления	$S_a$ , нм	$S_q$ , нм	$S_z$ , нм	$S_{ku}$	$S_{sk}$	ACM	СТМ
						$\bar{D}_c^*$	$\bar{D}_c^*$
схема 1	6,66	8,46	29,9	0,28	-0,05	$2,35 \pm 0,03$	$2,26 \pm 0,04$
схема 2	4,25	5,38	20,1	0,20	0,07	$2,28 \pm 0,02$	$2,12 \pm 0,02$

\* значение выбиралось из серии измерений на одном образце, масштабы исследуемых образцов указаны на рис. 1 и 2.

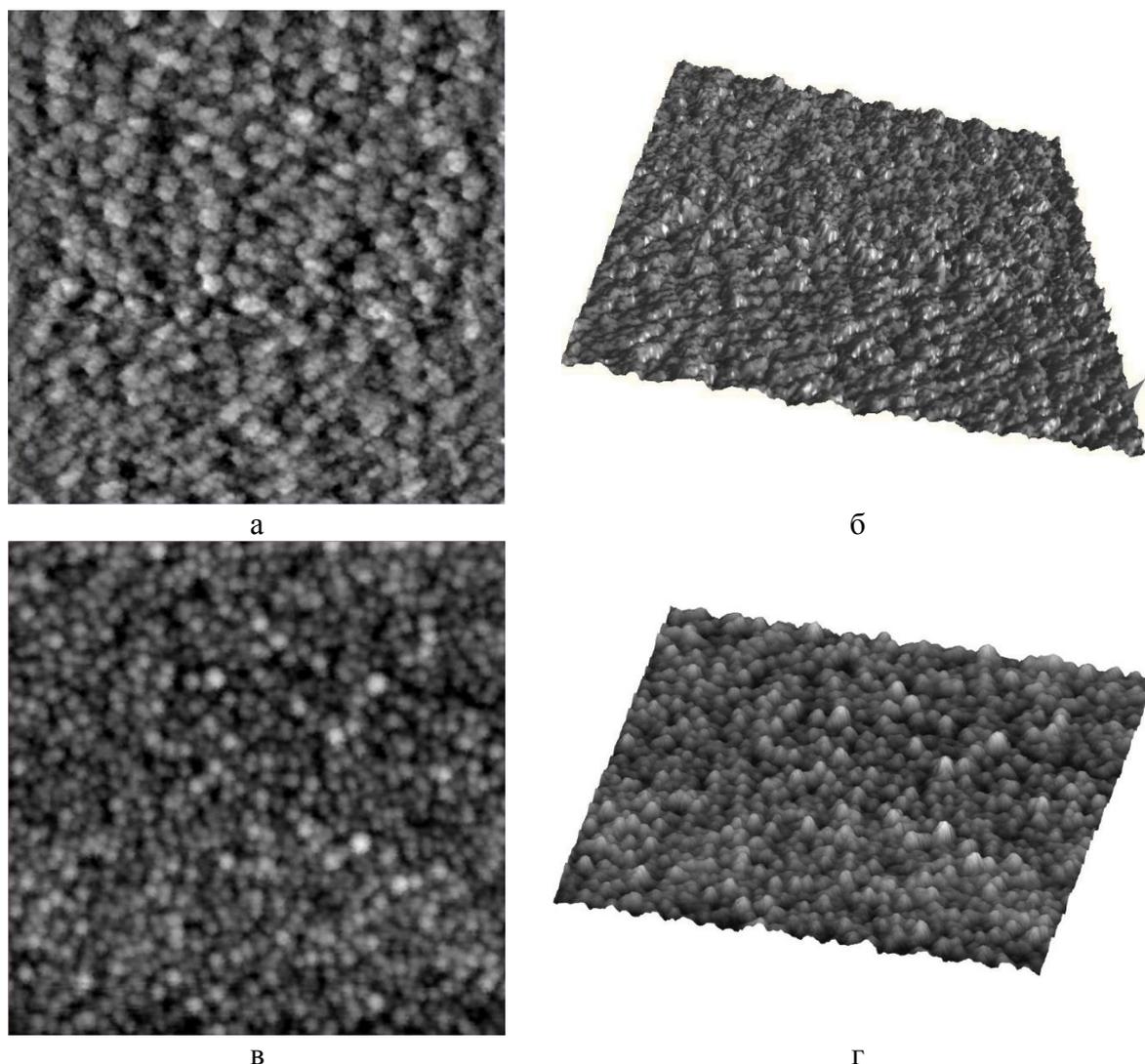


Рис. 2. Изображения поверхности платины на слюде, полученные по схеме 2: а – полученное с помощью туннельного микроскопа (размер области сканирования  $500 \times 500 \text{ nm}^2$ ), б – соответствующее 3D изображение; в – полученное с помощью атомно-силового микроскопа (размер области сканирования  $1000 \times 1000 \text{ nm}^2$ ), г – соответствующее 3D изображение.

Заметим, что полученные профили поверхности при схеме 1 и 2 принципиально отличны с позиции значений коэффициента асимметрии т.к. профиль поверхности с положительным коэффициентом асимметрии, имеет четкие высокие пики, которые выделяются от среднего. В то время как профиль поверхности с отрицательным коэффициентом асимметрии (пористые поверхности) имеет четкие впадины (лакуны) в гладких участках типа «плато» (рис. 1 б, г это ярко демонстрируют). Как и ожидалось, высотные параметры по абсолютным значениям значительно уменьшаются с увеличением толщины напыляемой пленки, также происходит уменьшение степени изрезанности профиля (уменьшается коэффициент эксцесса), что говорит о возможности некоторого

доминирования процессов структурообразования отдельных крупных агломератов с менее развитым фрактальным рельефом по отношению к локальным процессам образования мелких зерен. Такие отдельные агломераты могут формироваться как в процессе конденсации атомов и последующей коалесценции (автокоалесценции [22]), так и посредством механизма смачивания в твердом состоянии [23].

На рис. 3 нами представлены объемные профили рельефа, полученные с использованием оптического интерференционного профилометра NanoMap WLI 1000, для вышеназванных схем напыления. Вводя понятие локального рельефа, т.е. рельефа отдельных частей поверхности образца, можно говорить о том, что отдельные участки наноразмерных пленок платины имеют достаточно развитый высотный рельеф, это отчетливо видно на рис. 3 б. Однако, определенные недостатки методики крепления образца, а также возможный относительный изгиб пленки слюды, который появляется при подготовке подложки и отделении слоев не позволяет получать качественные 3D профили на малых разрешениях. При этом на доступных разрешениях по размерам пленки платины оптический интерференционный профилометр NanoMap WLI 1000 позволяет определять параметры шероховатости – высотные параметры, а также с высокой точностью разрешать профиль поверхности пленки.

На рис. 4 представлены результаты исследования поверхности двумя альтернативными методами: АСМ и СТМ наноразмерных пленок платины, полученных по схеме 3. Во-первых, интерес представляет наличие отдельных крупных агломератов типа «сопка», которые были сформированы во второй фазе напыления пленки платины. Во-вторых, как можно увидеть на 3D профиле наблюдается определенная симметрия в расположении таких агломератов (см. рис. 5). Данный факт был впервые нами обнаружен и требует дальнейшего глубокого исследования с целью выяснения механизма зарождения и роста таких структур в условиях, когда должна активно происходить деградация рельефа пленки, полученной по схеме 1. В теории все основные типы морфологических изменений [22] могут быть реализованы следующими способами: коалесценция, коагуляция, агрегирование, гетеродиффузия, миграция и т.д. На наш взгляд первый механизм, точнее его разновидности (жидкофазная коалесценция, миграционная коалесценция и автокоалесценция), по-видимому, доминируют в случае наноразмерных пленок, полученных технологией магнетронного напыления.

В дальнейшем исследовании данного эффекта необходимо продолжить, в том числе за счет изменения толщины пленки при последовательном напылении наноразмерных слоев.

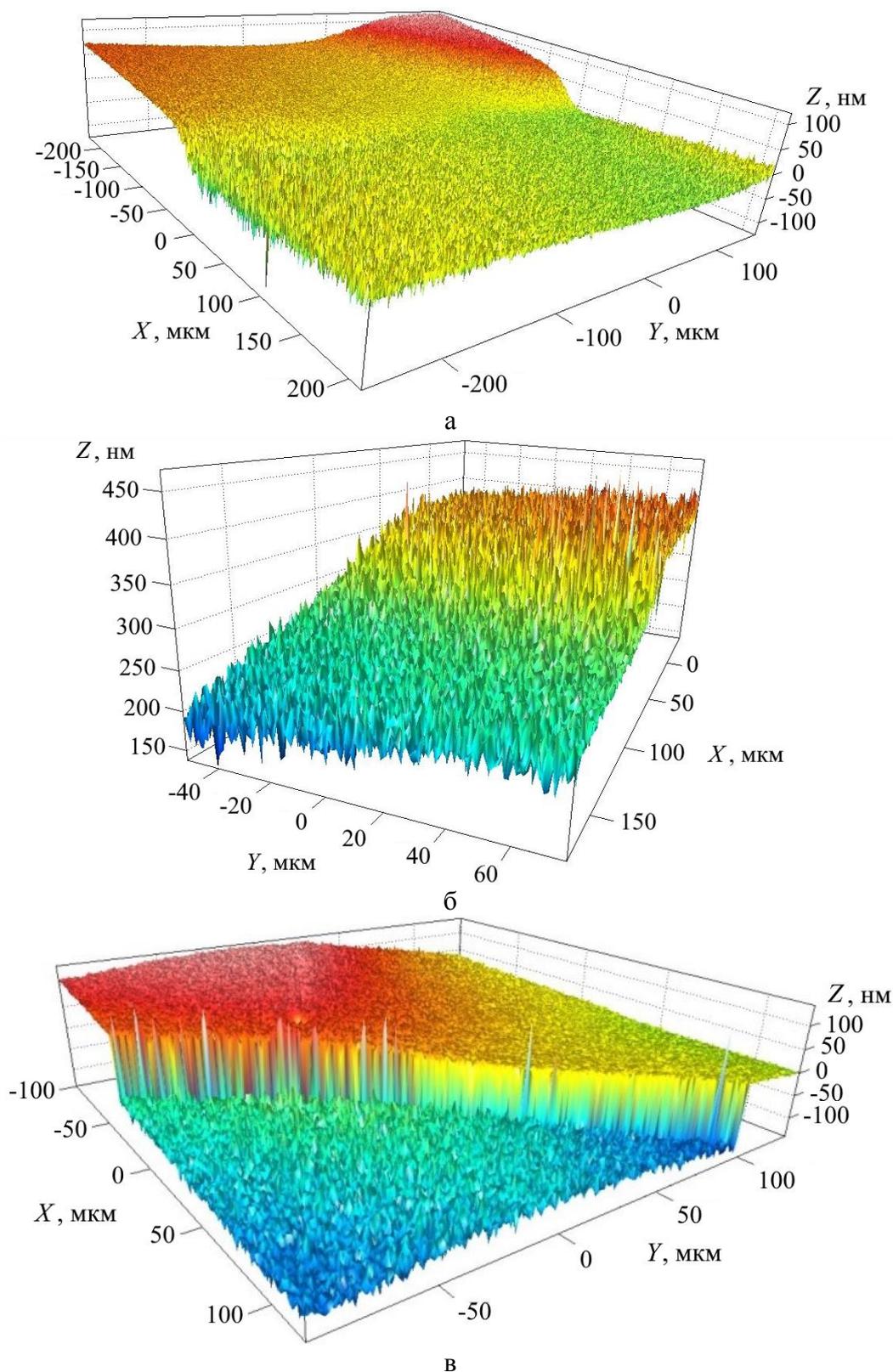


Рис. 3. 3D изображения поверхности платины на слюде: а – схема 1 (желто-зеленая область – слюда, желто-красная область – платина), б – схема 2 (сине-зеленая область – слюда, желто-красная область – платина), в – схема 3 (сине-зеленая область – слюда, желто-зеленая область – 3 слоя платина, красная область – 6 слоев платины).

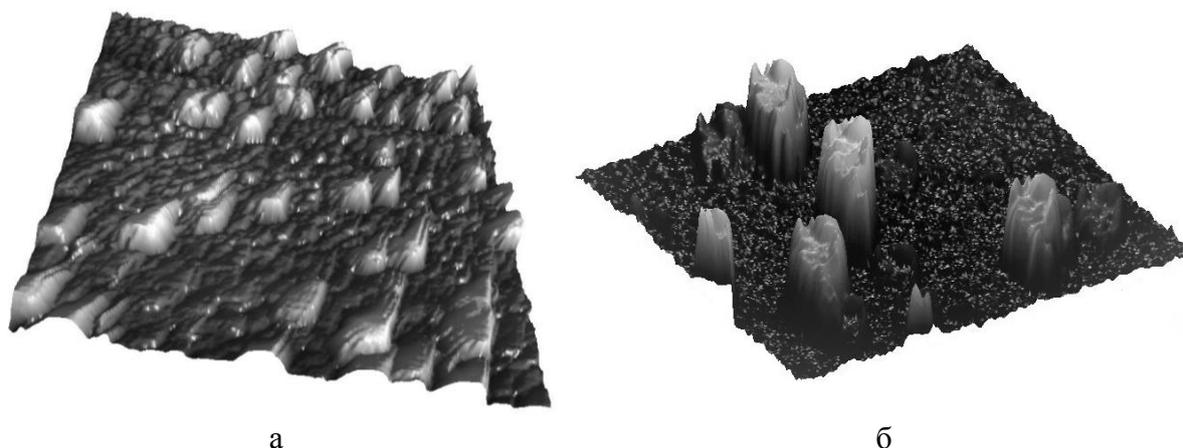


Рис. 4. 3D изображения поверхности на слюде, полученной по схеме 3: а – полученное с помощью туннельного микроскопа (размер области сканирования  $1000 \times 1000 \text{ нм}^2$ ), б – полученное с помощью атомно-силового микроскопа (размер области сканирования  $5000 \times 5000 \text{ нм}^2$ ).

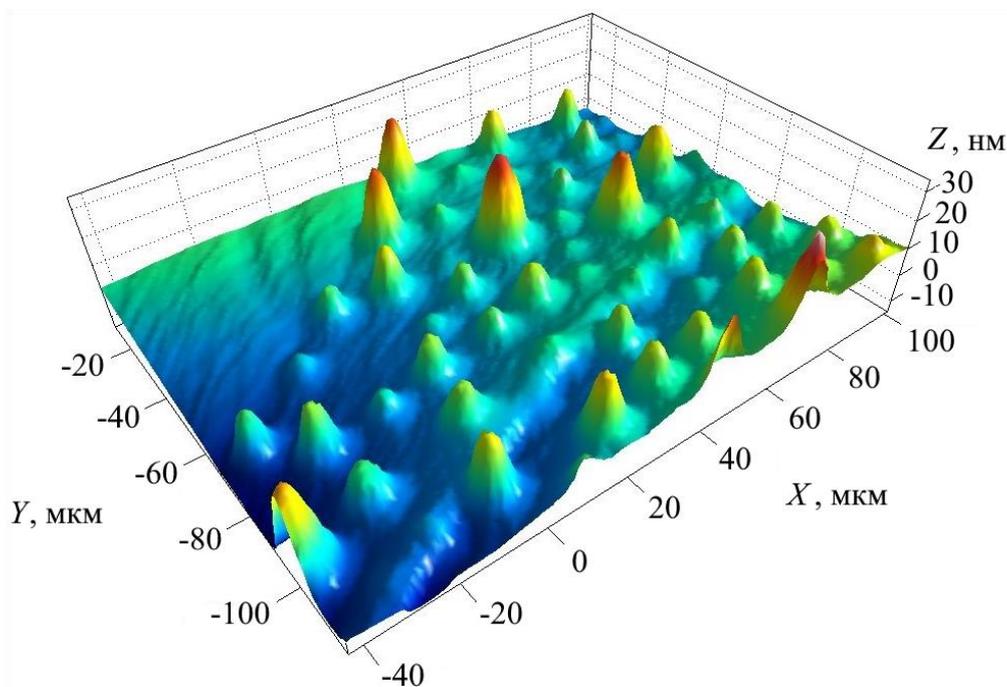


Рис. 5. 3D изображения поверхности платины на слюде, полученной по схеме 3.

## 5. Заключение

Несмотря на очевидный прогресс в изучении и описании механизма образования фрактальных структур, в том числе за счет механизма ассоциации, в настоящее время остается не вполне изученным влияние как состояния поверхности диэлектрической подложки (шероховатости поверхности, наличия дефектов, периодических структур), так и ряда технологических факторов – температуры подложки (или скорости ее изменения), внешнего давления, схемы напыления исходной пленки. Полученные значения фрактальной размерности для наноразмерных

пленок платины составляют в режиме АСМ  $\bar{D}_c = 2,28 \div 2,35$ , в режиме СТМ  $\bar{D}_c = 2,12 \div 2,26$ . Согласно имеющимся экспериментальным данным [24], на пленках платины, сформированных электрохимическим осаждением на поверхность  $n^+ - GaAs(100)$ , формируется фрактальный рельеф со значением фрактальной размерности  $D_c = 2,51 \pm 0,01$  (оценка выполнена методом триангуляции). Данное значение коррелирует с полученными нами данными. Вновь отметим, что в нашем случае для получения наноразмерных пленок мы использовали метод магнетронного напыления.

Косвенно наши результаты также могут быть подтверждены результатами работы [25], в которой пленки платины были созданы методом электрохимического осаждения из раствора серной кислоты и оксида платины. Полученные значения фрактальной размерности для сформированного таким способом рельефа поверхности пленки платины (время экспозиции более 5 часов перед исследованием с помощью СТМ) составили  $D_f = 2,5 \pm 0,1$  (значение  $D_f$  получено с использованием соотношения между фрактальной размерностью профиля и поверхности  $D_L = D_f - 1$ ).

На наш взгляд, дополнительным апробированием, в том числе с прогностической точки зрения является привлечение компьютерного эксперимента, в частности по моделированию/воспроизведению эпитаксиальной технологии роста [26]. Компьютерный эксперимент в состоянии обеспечить воспроизводимость результатов в зафиксированных условиях (метод подготовки пленки, внешние факторы, выбранный металл), но самое главное позволяет предсказывать закономерности при описании морфологических особенностей исследуемых наноразмерных пленок (устанавливать пределы изменения параметров шероховатости, предсказывать благоприятные условия для формирования «фрактального рельефа» и возможные пределы значений фрактальной размерности для профиля и поверхности пленки). При этом результаты компьютерного эксперимента (данные о координатах атомов и их взаимном расположении) позволили бы оценивать поверхностную энергию отдельных агломератов и ее размерную зависимость [27] или, например, параметры манжеты между двумя агломератами в процессе их коалесценции [28, 29], которые также позволяют оценить энергию границы зерен (grain boundary energy).

*Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2020-0007) и РФФИ (проекты № 18-03-00132 и 20-37-70007). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП Тверского государственного университета.*

### **Библиографический список:**

1. **Сдобняков, Н.Ю.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.В. Иванов. – Тверь: Тверской государственный университет, 2019. – 168 с.
2. **Брылкин, Ю.В.** Фрактальная геометрическая модель микроповерхности / Г.С. Иванов, Ю.В. Брылкин // Геометрия и графика. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 4-11. DOI: 10.12737/18053.
3. **Брылкин, Ю.В.** Тестирование алгоритма моделирования рельефа шероховатой поверхности на основе теории фракталов / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов, А.В. Флоров // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2014. – Т. IV. – № 5. – С. 86-89.
4. **Антонов, А.С.** Исследование фрактальных свойств наноразмерных пленок золота, серебра и меди: атомно-силовая и туннельная микроскопия / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, Д.В. Иванов и др. // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19. – № 3. – С. 473-486.
5. **Сдобняков, Н.Ю.** Определение фрактальной размерности островковых плёнок золота на слюде / Н.Ю. Сдобняков, Т.Ю. Зыков, А.Н. Базулев, А.С. Антонов // Вестник ТвГУ, серия «Физика». – 2009. – № 41. – Вып. 6. – С. 112-119.
6. **Semenova, E.M.** A comparative analysis of magnetic properties and microstructure of high coercivity  $Sm(CoCuFe)_5$  quasi-binary alloys in the framework of fractal geometry / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, Yu.V. Kuznetsova, D.Yu. Karpenkov, A.I. Ivanova, A.Yu. Karpenkov, D.V. Ivanov, A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1658. – Art. № 012050. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012050.
7. **Антонов, А.С.** Сравнительное исследование вольт-амперных характеристик туннельного контакта наноразмерных пленок золота и серебра / А.С. Антонов, Д.В. Иванов, И.И. Сорокина, Н.Ю. Сдобняков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – Вып. 8. – С. 13-18.
8. **Иванов, Д.В.** О «технологических» свойствах наноразмерных пленок никеля и меди / Д.В. Иванов, А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, А.Н. Шиманская, Е.В. Романовская, М.С. Афанасьев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 291-303. DOI: 10.26456/pcasenn/2018.10.291.
9. **Samsonov, V.M.** Size dependence of the melting temperature of metallic films: two possible scenarios / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov, A.G. Bembel, D.N. Sokolov, N.V. Novozhilov // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2013. – V. 5. – No. 4. – P. 04005-1-04005-3.
10. **Серов, И.Н.** Применение метода магнетронного распыления для получения структурированных тонких пленок / И.Н. Серов, Г.Н. Бельская, В.И. Марголин и др. // Известия РАН. Серия физическая. – 2003. – Т. 67. – № 4. – С. 575-578.
11. **Серов, И.Н.** Исследование воздействия фрактально-матричных структуризаторов на процессы образования и роста наноразмерных структур / И.Н. Серов, В.А. Жабрев, В.И. Марголин // Физика и химия стекла. – 2004. – Т. 30. – № 1. – С. 45-71.
12. **Серов, И.Н.** Получение и исследование наноразмерных пленок меди с фрактальной структурой / И.Н. Серов, Г.Н. Лукьянов, В.И. Марголин и др. // Микросистемная техника. – 2004. – № 1. – С. 31-38.
13. **Белко, А.В.** Фрактальная структура кластеров золота, образованных при осаждении

в вакууме на диэлектрические подложки / А.В. Белко, А.В. Никитин, Н.Д. Стрекаль, А.Е. Герман // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – № 5. – С. 11-15.

14. **Slătineanu, L.** Nanoreliefs obtained by various machining methods / L. Slătineanu, O. Dodun, M. Coteață, I. Beșliu. In: Nanostructures and thin films for multifunctional applications. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – Ch. 14. – P. 447-472. DOI: 10.1007/978-3-319-30198-3\_14.

15. **Harp, G.R.** Epitaxial growth of metals by sputter deposition / G.R. Harp, S.S.P. Parkin // Thin Solid Films. – 1996. – V. 288. – I. 1-2. – P. 315-324. DOI: 10.1016/S0040-6090(96)08808-6.

16. **Берлин, Е.** Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. Берлин, С. Двинин, Л. Сейдман. – М: Техносфера, 2007. – 176 с.

17. **KolosoV, A.Yu.** Investigation into the structure and features of the coalescence of differently shaped metal nanoclusters / A.Yu. Kolosov, N.Yu. Sdobnyakov, V.S. Myasnichenko, D.N. Sokolov / Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2016. – V. 10. – I. 6. – P. 1357-1364. DOI: 10.1134/S102745101605075X.

18. SPIP – Analytical Software for Microscopy. – Режим доступа: [www.url:https://www.imagemet.com/products/spip](http://www.url:https://www.imagemet.com/products/spip). – 15.11.2020.

19. Image Analysis P9. Руководство пользователя. – М.: НТ-МДТ СИ, 2019. – 582 с.

20. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Режим доступа: [www.url:http://gwyddion.net](http://www.url:http://gwyddion.net). – 15.10.2020.

21. **Самсонов, В.М.** О фрактальных свойствах агрегатов металлических нанокластеров на твердой поверхности / В.М. Самсонов, Ю.В. Кузнецова, Е.В. Дьякова // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. – Вып. 2. – С. 71-77.

22. **Трусов, Л.И.** Островковые металлические пленки / Л.И. Трусов, В.А. Холмянский. – М.: Металлургия, 1973. – 320 с.

23. **Бембель, А.Г.** Смачивание в твердом состоянии и динамика нанорельефа твердой поверхности / А.Г. Бембель, И.В. Талызин, В.М. Самсонов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 83-92. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.083.

24. **Torkhov, N.A.** Fractal geometry of the surface potential in electrochemically deposited platinum and palladium films / N.A. Torkhov, V.A. Novikov // Semiconductors. – 2009. – V. 43. – I. 8. – P. 1071-1077. DOI: 10.1134/S106378260908020X.

25. **Gómez-Rodríguez, J.M.** Fractal surfaces of gold and platinum electrodeposits: dimensionality determination by scanning tunneling microscopy / J.M. Gómez-Rodríguez, A.M. Baró, L. Vázquez, et al. // The Journal of Physical Chemistry. – 1992. – V. 96. – I. 1. – P. 347-350. DOI: 10.1021/j100180a064.

26. **Иванов, Д.В.** Моделирование процесса формирования фрактальных металлических пленок / Д.В. Иванов, С.А. Васильев, Н.Ю. Сдобняков, Е.В. Романовская, В.А. Анофриев, В.А. Кошелев, А.С. Антонов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 424-437. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.424.

27. **Myasnichenko, V.S.** Molecular dynamic investigation of size-dependent surface energy of icosahedral copper nanoparticles at different temperature / V.S. Myasnichenko, M. Razavi, M. Outokesh, N.Yu. Sdobnyakov, M.D. Starostenkov // Letters on materials. – 2016. – V. 6. – I. 4. – P. 266-270. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-4-266-270.

28. **Sdobnyakov, N.** Solution combustion synthesis and Monte Carlo simulation of the

formation of *CuNi* integrated nanoparticles / N. Sdobnyakov, A. Khort, V. Myasnichenko, K. Podbolotov, E. Romanovskaia, A. Kolosov, D. Sokolov, V. Romanovski // *Computational Materials Science*. – 2020. – V. 184. – Art. № 109936. – 12 p. DOI: 10.1016/j.commatsci.2020.109936.

29. **Grammatikopoulos, P.** Computational modeling of nanoparticle coalescence / P. Grammatikopoulos, M. Sowwan, J. Kioseoglou // *Advanced Theory and Simulations*. – 2019. – V. 2. – I. 6. – P. 1900013-1-1900013-26. DOI: 10.1002/adts.201900013.

### References:

1. **Sdobnyakov, N.Yu.** Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyi analiz metallicheskih plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric surfaces: monograph] / N.Yu. Sdobnyakov, A.S. Antonov, D.V. Ivanov. – Tver: Tverskoj gosudarstvenniy universitet, 2019. – 168 p. (In Russian).

2. **Brylkin, Yu.V.** Fractal geometric microsurface model / G.S. Ivanov, Yu.V. Brylkin // *Geometriya i grafika*. – 2016. – T. 4. – № 1. – P. 4-11. DOI: 10.12737/18053. (In Russian).

3. **Brylkin, Yu.V.** Testing a rough surface relief modeling algorithm based on fractal theory / Yu.V. Brylkin, A.L. Kusov, A.V. Florov // *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta*. – 2014. – V. IV. – № 5. – P. 86-89. (In Russian).

4. **Antonov, A.S.** Issledovanie fraktal'nykh svoystv nanorazmernykh plenok zolota, serebra i medi: atomno-silovaya i tunnel'naya mikroskopiya [Investigation of the fractal properties of nanoscale films of gold, silver and copper: atomic force and tunneling microscopy] / A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov, D.V. Ivanov et al. // *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. – 2017. – V. 19. – № 3. – P. 473-486. (In Russian).

5. **Sdobnyakov, N.Yu.** Opredelenie fraktal'noi razmernosti ostrovkovykh plenok zolota na slyude [Determination of the fractal dimension of island films of gold on mica] / N.Yu. Sdobnyakov, T.Yu. Zykov, A.N. Bazulev, A.S. Antonov // *Vestnik TvGU, seriya «Fizika»*. – 2009. – № 41. – I. 6. – P. 112-119. (In Russian).

6. **Semenova, E.M.** A comparative analysis of magnetic properties and microstructure of high coercivity  $Sm(CoCuFe)_5$  quasi-binary alloys in the framework of fractal geometry / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, Yu.V. Kuznetsova, D.Yu. Karpenkov, A.I. Ivanova, A.Yu. Karpenkov, D.V. Ivanov, A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1658. – Art. № 012050. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1658/1/012050.

7. **Antonov, A.S.** Sravnitel'noe issledovanie vol't-ampernykh kharakteristik tunnel'nogo kontakta nanorazmernykh plenok zolota i serebra [Comparative investigation of the current-voltage characteristics of tunnelling contact for nanosized gold and silver films] / A.S. Antonov, D.V. Ivanov, I.I. Sorokina, N.Yu. Sdobnyakov // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2016. – I. 8. – P. 13-18. (In Russian).

8. **Ivanov, D.V.** O «tekhnologicheskikh» svoystvakh nanorazmernykh plenok nikelya i medi [About «technological» properties of nano-sized nickel and copper films] / D.V. Ivanov, A.S. Antonov, N.Yu. Sdobnyakov, H.N. Shimanskaya, E.V. Romanovskaia, M.S. Afanasiev // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2018. – I. 10. – P. 291-303. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.291. (In Russian).

9. **Samsonov, V.M.** Size dependence of the melting temperature of metallic films: two possible scenarios / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov, A.G. Bembel, D.N. Sokolov,

N.V. Novozhilov // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2013. – V. 5. – No. 4. – P. 04005-1-04005-3.

10. **Serov, I.N.** Primenenie metoda magnetronnogo raspyleniya dlya polucheniya strukturirovannykh tonkikh plenok [The application of magnetron sputtering to obtain structured thin films] / I.N. Serov, G.N. Bel'skaya, V.I. Margolin et al. // Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya. – 2003. – V. 67. – I. 4. – P. 575-578. (In Russian).

11. **Serov, I.N.** Investigation into the influence of fractal-matrix structurizers on the formation and growth of nanostructures / I. N. Serov, V. A. Zhabrev, V. I. Margolin // Glass Physics and Chemistry. – 2004. – V. 30. – I. 1. – P. 32-50. DOI: 10.1023/B:GPAC.0000016396.36549.ad.

12. **Serov, I.N.** Poluchenie i issledovanie nanorazmernykh plenok medi s fraktal'noi strukturoi [Preparation and study of nanoscale films of copper with a fractal structure] / I.N. Serov, G.N. Luk'yanov, V.I. Margolin et al. // Mikrosistemnaya tekhnika. – 2004. – № 1. – P. 31-38. (In Russian).

13. **Belko, A.V.** Fractal structure of gold clusters formed under vacuum deposition on dielectric substrates / A.V. Belko, A.V. Nikitin, N.D. Strekal', A.E. German // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2009. – V. 3. – I. 3. – P. 338-342. DOI: 10.1134/S1027451009030021.

14. **Slătineanu, L.** Nanoreliefs obtained by various machining methods / L. Slătineanu, O. Dodun, M. Coteață, I. Beșliu. In: Nanostructures and thin films for multifunctional applications. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – Ch. 14. – P. 447-472. DOI: 10.1007/978-3-319-30198-3\_14.

15. **Harp, G.R.** Epitaxial growth of metals by sputter deposition / G.R. Harp, S.S.P. Parkin // Thin Solid Films. – 1996. – V. 288. – I. 1-2. – P. 315-324. DOI: 10.1016/S0040-6090(96)08808-6.

16. **Berlin, E.** Vakuumnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya naneseniya i travleniya tonkikh plenok [Vacuum technology and equipment for applying and etching thin films] / E. Berlin, S. Dvinin, L. Seidman. – M.: Tekhnosfera, 2007. – 176 p. (In Russian).

17. **Koloso, A.Yu.** Investigation into the structure and features of the coalescence of differently shaped metal nanoclusters / A.Yu. Koloso, N.Yu. Sdobnyakov, V.S. Myasnichenko, D.N. Sokolov // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2016. – V. 10. – I. 6. – P. 1357-1364. DOI: 10.1134/S102745101605075X.

18. SPIP – Analytical Software for Microscopy. – Access mode: [www.url:https://www.imagemet.com/products/spip](http://www.url:https://www.imagemet.com/products/spip). – 15.11.2020.

19. Image Analysis P9. Manual. – M.: NTMDT-SI, 2019. – 582 p. (In Russian).

20. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM, ...) data analysis software. – Access mode: [www.url: http://gwyddion.net](http://www.url:http://gwyddion.net). – 15.10.2020.

21. **Samsonov, V.M.** Fractal properties of aggregates of metal nanoclusters on solid surface / V.M. Samsonov, Y.V. Kuznetsova, E.V. D'yakova // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2016. – V. 61. – I. 2. – P. 227-232. DOI: 10.1134/S1063784216020201.

22. **Trusov, L.I.** Ostrovkovye metallicheskie plenki [Island metal films] / L.I. Trusov, V.A. Kholmyanskii. – M.: Metallurgiya, 1973. – 320 p. (In Russian).

23. **Bembel, A.G.** Smachivanie v tverdom sostoyanii i dinamika nanorel'efa tverdoi poverkhnosti [Solid state wetting and dynamics of solid surface nanorelief] / A.G. Bembel, I.V. Talyzin, V.M. Samsonov // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2018. – I. 10. – P. 83-92. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.083. (In Russian).

24. **Torkhov, N.A.** Fractal geometry of the surface potential in electrochemically deposited

- platinum and palladium films / N.A. Torkhov, V.A. Novikov // *Semiconductors*. – 2009. – V. 43. – I. 8. – P. 1071-1077. DOI: 10.1134/S106378260908020X.
25. **Gómez-Rodríguez, J.M.** Fractal surfaces of gold and platinum electrodeposits: dimensionality determination by scanning tunneling microscopy / J.M. Gómez-Rodríguez, A.M. Baró, L. Vázquez, et al. // *The Journal of Physical Chemistry*. – 1992. – V. 96. – I. 1. – P. 347-350. DOI: 10.1021/j100180a064.
26. **Ivanov, D.V.** Modelirovanie protsessy formirovaniya fraktal'nykh metallicheskih plenok [Simulation of the fractal metal films formation] / D.V. Ivanov, S.A. Vasilyev, N.Yu. Sdobnyakov, E.V. Romanovskaia, V.A. Anofriev, A.V. Koshelev, A.S. Antonov // *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. – 2020. – I. 12. – P. 424-437. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.424. (In Russian).
27. **Myasnichenko, V.S.** Molecular dynamic investigation of size-dependent surface energy of icosahedral copper nanoparticles at different temperature / V.S. Myasnichenko, M. Razavi, M. Outokesh, N.Yu. Sdobnyakov, M.D. Starostenkov // *Letters on materials*. – 2016. – V. 6. – I. 4. – P. 266-270. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-4-266-270.
28. **Sdobnyakov, N.** Solution combustion synthesis and Monte Carlo simulation of the formation of CuNi integrated nanoparticles / N. Sdobnyakov, A. Khort, V. Myasnichenko, K. Podbolotov, E. Romanovskaia, A. Kolosov, D. Sokolov, V. Romanovski // *Computational Materials Science*. – 2020. – V. 184. – Art. № 109936. – 12 p. DOI: 10.1016/j.commatsci.2020.109936.
29. **Grammatikopoulos, P.** Computational modeling of nanoparticle coalescence / P. Grammatikopoulos, M. Sowwan, J. Kioseoglou // *Advanced Theory and Simulations*. – 2019. – V. 2. – I. 6. – P. 1900013-1-1900013-26. DOI: 10.1002/adts.201900013.

*Original paper*

#### **OBTAINING NANOSIZED PLATINUM FILMS WITH FRACTAL PROPERTIES**

D.V. Ivanov<sup>1</sup>, A.S. Antonov<sup>1,2</sup>, E.M. Semenova<sup>1</sup>, A.I. Ivanova<sup>1</sup>, S.A. Tretyakov<sup>1</sup>, N.Yu. Sdobnyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Tver State University, Tver, Russia*

<sup>2</sup>*Tver State Agricultural Academy, Tver, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.073

**Abstract:** A comprehensive study of the morphology of the relief of nanosized platinum films on the mica surface was carried out using a scanning probe (in the atomic force mode) and tunneling microscopes, as well as an optical interference profilometer. Characteristic features of the surface nanorelief of platinum films of various thicknesses, including fractal properties, are described. The values of the fractal dimension were obtained for films of different thicknesses using two alternative methods of investigation at different initial scales of samples: based on the data of an atomic force microscope –  $\bar{D}_c = 2,28 \div 2,35$  and a scanning tunneling microscope –  $\bar{D}_c = 2,12 \div 2,26$ . For comparison, experimental data of other authors are presented. Recommendations for development of the technology for «growing» structures with a given surface morphology are proposed.

**Keywords:** *scanning probe microscopy, atomic force microscope mode, scanning tunneling microscopy, nanorelief, roughness parameters, fractal dimension, platinum films.*

*Иванов Дмитрий Викторович – аспирант кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»*

*Антонов Александр Сергеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»; старший преподаватель ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»*

*Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»*

*Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»*

*Третьяков Сергей Андреевич – к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»*

*Сдобняков Николай Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»*

*Dmitry V. Ivanov – postgraduate student of the General Physics Department, Tver State University*

*Alexander S. Antonov – Ph. D., Researcher, Tver State University, Senior Lecturer, Tver State Agricultural Academy*

*Elena M. Semenova – Ph. D., Docent of the Condensed Matter Physic Department, Tver State University*

*Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Docent of the Applied Physics Department, Tver State University*

*Sergey A. Tretyakov – Ph. D., Senior Lecturer, Department of Applied Physics, Tver State University*

*Nickolay Yu. Sdobnyakov – Ph. D., Docent of the General Physics Department, Tver State University*

Поступила в редакцию/received: 15.10.2020; после рецензирования/reviced: 07.11.2020; принята/accepted 11.11.2020.