

УДК 535.016; 538.911; 543.063.22

## **СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА СЛОЁВ НАНО- /МИКРОЧАСТИЦ СЕРЕБРА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ЯДЕРНЫХ ФИЛЬТРОВ МЕТОДОМ АЭРОЗОЛЬНОГО НАПЫЛЕНИЯ**

(получена 09.01.2014, принята в печать – 14.09.2014)

<sup>1,3</sup>А.С.Смолянский, <sup>2</sup>В.А.Загайнов, <sup>1</sup>Ю.Г.Бирюков,  
<sup>3</sup>Э.П.Магомедбеков, <sup>3,4</sup>О.Г.Степанова, <sup>1,5</sup>Л.И.Трахтенберг

<sup>1</sup>ОАО ГНЦ РФ «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский  
физико-химический институт имени Л.Я. Карпова», Москва, Россия  
<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия  
<sup>4</sup>ООО «ЭКОСХИМ-ХТ», Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт химической физики им. Н.Н.Семёнова РАН, Москва, Россия

Разработано научно-техническое обоснование метода получения слоёв нано-микроструктур серебра на поверхности ядерных фильтров посредством пропускания аэрозоля нано-микро частиц серебра сквозь поры мембранны. Изготовлены экспериментальные образцы ядерных фильтров, модифицированных нано-микроструктурами серебра и проведено исследование строения слоёв нано-микроструктур серебра методами растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Установлено, что с увеличением концентрации частиц серебра в аэрозоле от  $\sim 10^5$  до  $4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  происходит изменение строения покрытия из нано-микроструктур серебра от островковой плёнки, состоящей из изолированных сферических частиц серебра размером от 20 до 200 нм, до образования фрагментов сплошного покрытия на поверхности подложки толщиной до  $\sim 0,3 - 0,5 \text{ мкм}$ . Сделан вывод о протекании интенсивных процессов коагуляции нано-микро частиц серебра, осевших из аэрозоля на поверхность ядерного фильтра, которые приводят к образованию нано-микроструктур разнообразной формы и размеров.

**Ключевые слова:** аэрозоль, осаждение, серебро, наночастица, микрочастица, наноструктура, ядерный фильтр, растровая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, коагуляция, кластерообразование.

## **THE STRUCTURAL PROPERTIES OF THE LAYERS OF SILVER NANO- /MICROPARTICLES, SYNTHESIZED ON THE SURFACE OF NUCLEAR FILTERS BY THE METHOD OF AEROSOL SPRAYING**

<sup>1,3</sup>A.S. Smolyanskii, <sup>2</sup>V.A. Zagaynov, <sup>1</sup>Yu.G. Biryukov,  
<sup>3</sup>E.P. Magomedbekov, <sup>3,4</sup>O.G. Stepanova,  
<sup>1,5</sup>L.I. Trakhtenberg

<sup>1</sup>OJSC SSC RF «Karpov institute of Physical Chemistry», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research University «MEPhI»

<sup>3</sup>D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

<sup>4</sup>LLC «ECOSCHIM-CHT», Moscow, Russia;

<sup>5</sup>Institute of chemical physics n.a. N.N.Semenov, Russian Academy of Sciences, Moscow

A scientific and technical feasibility of the method of obtaining layers of nano-microstructured silver on the surface of nuclear filters by passing the aerosol nano-micro particles of silver through the pores of a membrane has been developed. Experimental samples of nuclear filters modified nano-microstructured silver have been prepared,

and a study of structure of the layers of nano-microstructured silver by scanning electron and atomic force microscopy has been carried out. It is found that increasing of the silver particle concentration in the aerosols from  $\sim 10^5$  to  $4 \cdot 10^6$   $\text{cm}^{-3}$  yields a change in the structure of the coating of nano-microstructures of silver from islet film consisting of isolated spherical silver particles ranging in size from 20 to 200 nm to the formation of solid fragments on the surface of the substrate of a thickness up to  $\sim 0.3$  to 0.5  $\mu\text{m}$ . It is concluded that the intense processes of coagulation of the silver nano- and microparticles deposited from the aerosol that leads to formation of silver nano-and microstructures of various shapes and sizes occurred on the surface of nuclear filters.

**Keywords:** aerosol deposition, silver nanoparticle microparticle, nanostructure, light, transmission, reflection, nuclear filter.

## 1. Введение

Создание научных основ новых технологий изготовления нано-микроструктур (НМС) и наноматериалов (НМ) является одним из основных направлений исследований в области нанотехнологий [1]. Перспективным подходом для создания новых НМС и НМ является использование ядерных фильтров (ЯФ) в качестве подложек для получения методом темплатного синтеза НС металлов и других видов НМ [2].

Разработка методов контролируемого синтеза и контроля состава аэрозолей металлических частиц [3] создаёт предпосылки для создания новых методов изготовления наноструктурированных металлов, основанных на осаждении частиц аэрозоля на поверхность пористой подложки (в частности, - ЯФ) при пропускании аэрозоля сквозь микропоры подложки (далее – методы аэрозольного напыления).

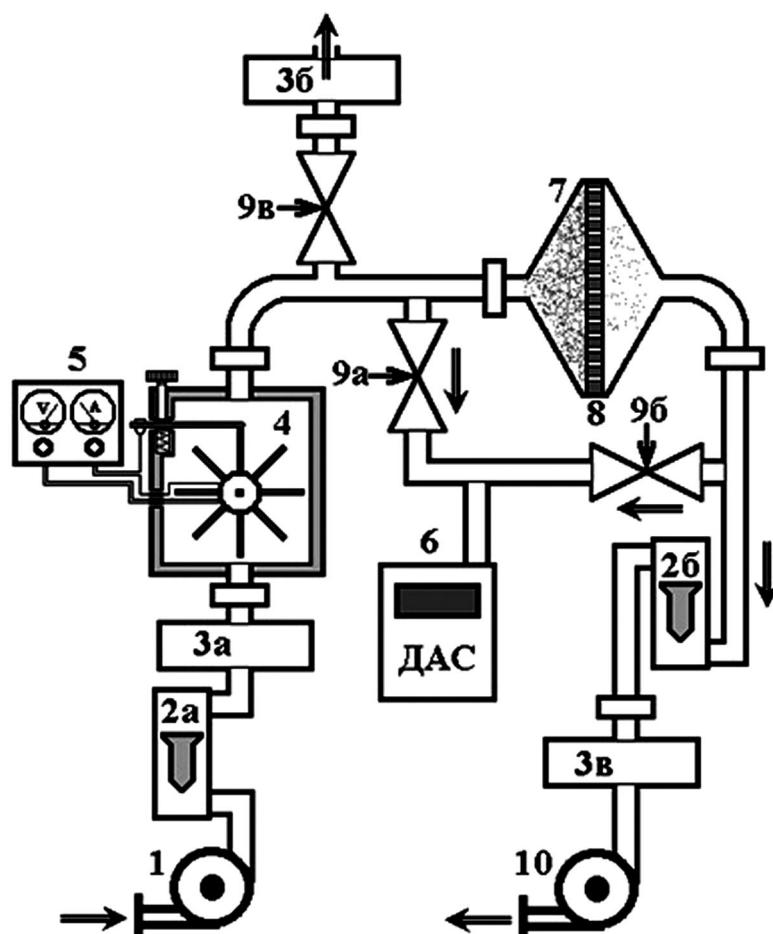
Цель настоящего исследования состояла в обосновании возможности синтеза методом аэрозольного напыления и изучения структуры и фотометрических свойств НМС серебра на поверхности ЯФ.

## 2. Объекты и методы исследования

ЯФ были получены из двухосно-ориентированных полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) пленок толщиной  $10 \pm 1$  мкм (ГОСТ 24234-80); степень вытяжки 3, степень кристалличности - не выше 50%, плотность - 1400 кг/м<sup>3</sup>, молекулярная масса 31000. В качестве наполнителя материал содержал каolin; его массовая доля - 0,2. Облучение потоком тяжёлых ионов ( $^{54}\text{Xe}^{129}$ , энергия  $\sim 1$  МэВ/нуклон, флюенс  $\sim 3 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>) проводили в Лаборатории Ядерных Реакций им. Г.Н. Флерова (ОИЯИ, г. Дубна) на ускорителе тяжелых ионов У-300 в условиях вакуума, при комнатной температуре. Химическая обработка облученных ионами пленок ПЭТФ осуществлялась в водных растворах 0.5÷5 N NaOH в области температур 303÷353 К. В результате в пленке ПЭТФ возникал массив открытых микропор цилиндрической формы со средним диаметром  $\sim 0.2$  мкм.

Метод аэрозольного напыления состоит из следующих стадий: а) формирование аэрозоля нано- и микрочастиц серебра в электрической дуге, получаемой в режиме короткого замыкания серебряных электродов в разрядном устройстве, б) проведение диагностики состава аэрозоля с использованием диффузационного аэрозольного спектрометра (ДАС); в) пропускание аэрозоля серебряных нано- и микрочастиц сквозь пористую полимерную подложку (ЯФ) и формирование НМС серебра (Ag-НМС) на поверхности ЯФ. Преимуществом применения метода аэрозольного напыления для синтеза Ag-НМС по сравнению с традиционно используемым методом электролитического осаждения серебра в поры подложки [2] является малое количество технологических операций, высокая чистота используемых материалов, низкая вероятность протекания побочных реакций.

Схема метода аэрозольного напыления приведена на Рис. 1: поток воздуха из атмосферы нагнетается компрессором (1) через аэрозольный фильтр (3а) для очистки от частиц механических загрязнений и пыли, затем поступает в генератор аэрозоля (4), где в момент короткого замыкания, образуется электрическая дуга с заданными и контролируемыми вольт-амперными характеристиками. При этом часть материала контактирующих электродов испаряется, образуя аэрозоль металлов сnano-/микрочастицами преимущественно сферической формы. Увлекаемые потоком воздуха, частицы аэрозоля попадают в рабочую камеру (7) где проходят сквозь ячейку с пористой полимерной подложкой (8). Ротаметры (2а), (2б) служат для определения характеристик потоков аэрозолей, прошедших через генератор аэрозолей и рабочую камеру.



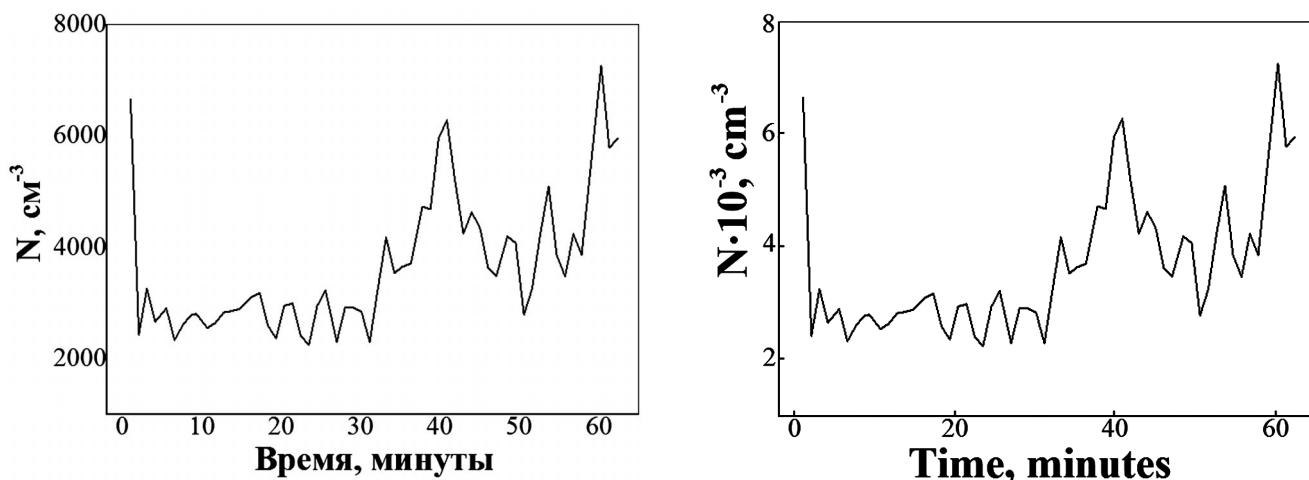
**Рис. 1. Схема установки для синтезаnano-/микроструктур металлов методом аэрозольного напыления:** 1 - компрессор; 2<sub>a</sub>, 2<sub>b</sub> - ротаметр; 3<sub>a</sub>, 3<sub>b</sub>, 3<sub>c</sub> - аэрозольный фильтр; 4 - генератор аэрозоля; 5 - блок управления генератора; 6 - диффузионный аэрозольный спектрометр; 7 - рабочая камера; 8 - образец НМС металла на поверхности пористой полимерной подложки; 9<sub>a</sub>, 9<sub>b</sub>, 9<sub>c</sub> - регулировочные вентили; 10 - насос.

**Scheme of the installation for the synthesis of the metal nano-/microstructures by method the deposition of the aerosoles:** 1 - compressor; 2<sub>a</sub>, 2<sub>b</sub> - rotameter; 3<sub>a</sub>, 3<sub>b</sub>, 3<sub>c</sub> - aerosol filter; 4 - aerosol generator; 5 - control unit generator; 6 - diffusion aerosol spectrometer; 7 - working chamber; 8 - sample NMS metal on the surface of porous polymeric substrate; 9<sub>a</sub>, 9<sub>b</sub>, 9<sub>c</sub> - adjusting valves; 10 - the pump.

При помощи вентиля (9в) создаётся небольшое избыточное давление в рабочей камере, а насос (10) обеспечивает необходимый поток воздуха через полимерную подложку, имеющую большое сопротивление. Аэрозольные фильтры (3б), (3в) служат для улавливания аэрозольных частиц, не осевших на подложку.

При помощи диффузионного аэрозольного спектрометра ДАС (6) можно регистрировать объёмную концентрацию частиц серебра в аэрозоле, как на входе, так и на выходе из рабочей камеры во время проведения операции напыления. На рисунке 2 представлена зависимость изменения объёмной концентрации аэрозоля серебра при изготовлении Ag-HMC в режиме № 1 (таблица 1). Сопоставляя с объёмной концентрацией аэрозоля на входе в рабочую камеру (7) (таблица 1), можно заключить, что ЯФ является малопроницаемым материалом для синтезированного аэрозоля частиц серебра, и способен задерживать большинство частиц аэрозоля (входная текущая концентрация  $\sim 1,5 \cdot 10^5$  част./мин), из которых впоследствии происходит формирование Ag-HMC на поверхности ЯФ.

В результате измерений с помощью ДАС распределения частиц аэрозоля по размерам на входе и на выходе из рабочей камеры (7) за время напыления образца ЯФ, оказывается возможным рассчитать зависимость коэффициента проскока частиц серебра сквозь ЯФ от размера частиц (Рис. 3).



**Рис. 2. Зависимость объёмной концентрации частиц аэрозоля серебра после прохождения сквозь ядерный фильтр в процессе изготовленияnano-/микроструктуры серебра по первому режиму, от времени напыления.**  
*Volume concentration of the silver particles in the aerosol which passed through the nuclear filter during preparation of the silver nano-/microstructure in the first regime from the time of deposition.*

Таблица 1

**Режимы получения nano- и микроструктур серебра различных видов на поверхности ядерных фильтров**

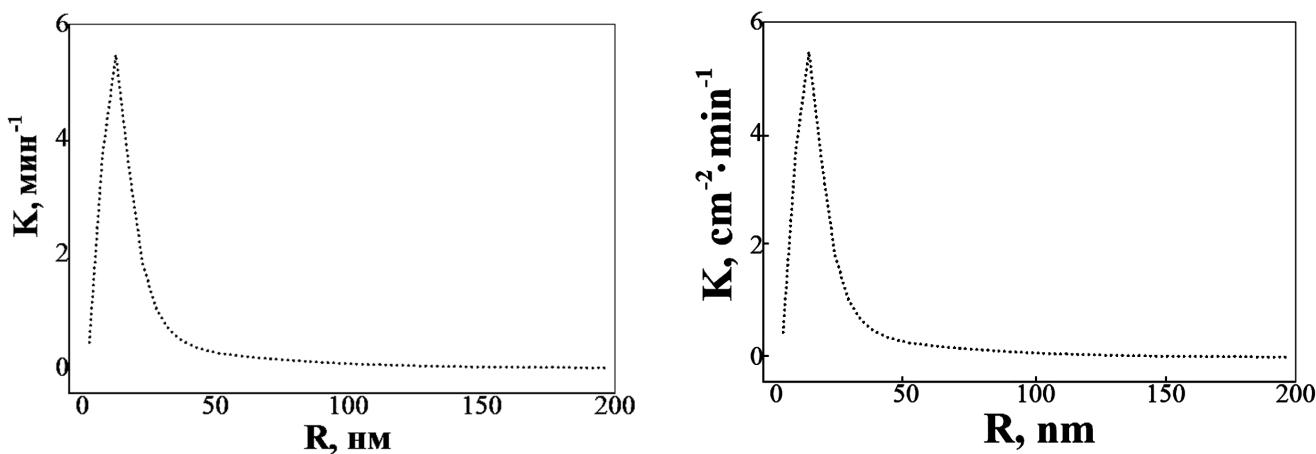
Table 1

**Modes of obtaining the different species of the silver nano - and microstructures on the surface of nuclear filters**

Параметры работы прибора, характеристика аэрозоля	Образец		
	1	2	3
Время напыления, час	1	2	2
Ток короткого замыкания, мА	500	750	1000
Рабочее напряжение, В	7	7	7
Амплитуда импульса, В	0,26	0,26	0,26
Напряжение короткого замыкания, В	30	30	30
Концентрация частиц серебра в аэрозоле, шт/см <sup>3</sup>	156000	3340000	4380000
Скорость потока воздуха, л/мин	1	1	1
Число оборотов ротора, об/с	20	20	20
Среднеквадратичная дисперсия распределения частиц серебра по размерам, нм	$8 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$6,6 \cdot 10^{-9}$
Диаметр частиц серебра, соответствующий максимуму распределения по размерам, нм	49	28	30

Как следует из рисунка 3, сквозь микропоры ЯФ способны проходить преимущественно частицы серебра с размерами до 50 нм. Частицы серебра больших размеров практически полностью осаждаются на поверхности ЯФ, и в результате процессов агрегации и коагуляции, протекающих на поверхности ЯФ, формируют Ag-HMC разнообразных видов и форм (Рис. 4, а–в). В экспериментах использовали образцы ЯФ в виде дисков Ø25 мм. Диаметр области напыления металла на поверхности ЯМ – не более 15 мм.

Аналогично были синтезированы образцы Ag-HMC на поверхности ЯФ во втором и в третьем режиме (таблица 1). Детальное описание закономерностей прохождения аэрозолей металлов сквозь ЯФ будет приведено в отдельном сообщении.



*Рис. 3. Зависимость величины коэффициента проскара для аэрозоля частиц серебра сквозь ядерный фильтр в процессе изготовленияnano-/микроструктуры серебра по первому режиму, от размера частиц.*  
*Penetration coefficients for the aerosol of silver particles which passed through the nuclear filter during preparation of the silver nano-/microstructure in the first regime depending on the size of the particles.*

Исследование строения Ag-HMC методами растровой электронной (РЭМ) и атомно-силовой (АСМ) микроскопии проводили с помощью электронного микроскопа Quanta и сканирующего зондового микроскопа «ИНТЕГРА-Терма». В измерениях методами РЭМ и АСМ использовали фрагменты образцов ЯФ размером 5×5 мм.

### 3. Результаты и обсуждение

Как следует из результатов изучения поверхности образцов ЯФ методом РЭМ (Рис. 4, а), использованных в качестве подложки для изготовления Ag-HMC, ионно-лучевая обработка и последующее воздействие концентрированных водных растворов гидроксида натрия приводят к формированию массива открытых пор с диаметром от 190 до 240 нм. Последующий АСМ-анализ (Рис. 4 б, с, Таблица 2) позволил заключить, что поверхность ЯФ содержит многочисленные выступы со средней высотой ~130 нм; средняя шероховатость поверхности при этом составляет ~18 нм. Распределение по высоте неоднородностей на поверхности ЯФ можно аппроксимировать двумя гауссовыми кривыми с максимумами при 124 и 140 нм (таблица 3), происхождение которых можно связать с особенностями микрорельфа поверхности ЯФ, возникающего после радиационной и химической обработки ПЭТФ (боковые грани кристаллов, поверхностные дефекты и т.д.).

В результате обработки ЯФ аэрозолем серебра в первом режиме (таблица 1) на поверхности мембранны происходит формирование Ag-HMC в виде островковой плёнки из изолированных nano- и микрочастиц серебра сферической формы, осевших на поверхности подложки (Рис. 5, а). В соответствии с условиями приготовления Ag-HMC (Рис. 1, 2, Таблица 1), можно оценить поверхностную концентрацию nano-/микро-частиц серебра ~ $1,83 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , среднеквадратичное расстояние между которыми составляет  $S_q \sim 233,8 \text{ нм}$ . Как следует из АСМ-измерений (Рис. 5, б), появление частиц серебра на поверхности ЯФ приводит к существенному возрастанию величины среднего размера неоднородности и шероховатости поверхности (312,95 и 28,34 нм, соответственно). Форма кривой распределения по высоте неоднородностей поверхности ЯФ с Ag-HMC-1 (Рис. 5, с) в целом повторяет форму гистограммы, установленной для исходного ЯФ, однако обнаружен сдвиг максимумов распределения в сторону более высоких значений неоднородности (вплоть до 237,4 и 264,6 нм, соответственно), что можно объяснить появлением на поверхности ЯФ островковой плёнки nano- и микрочастиц серебра. Из приведённых оценок можно получить, что толщина слоя частиц серебра на поверхности ЯФ составляет ~100 нм.

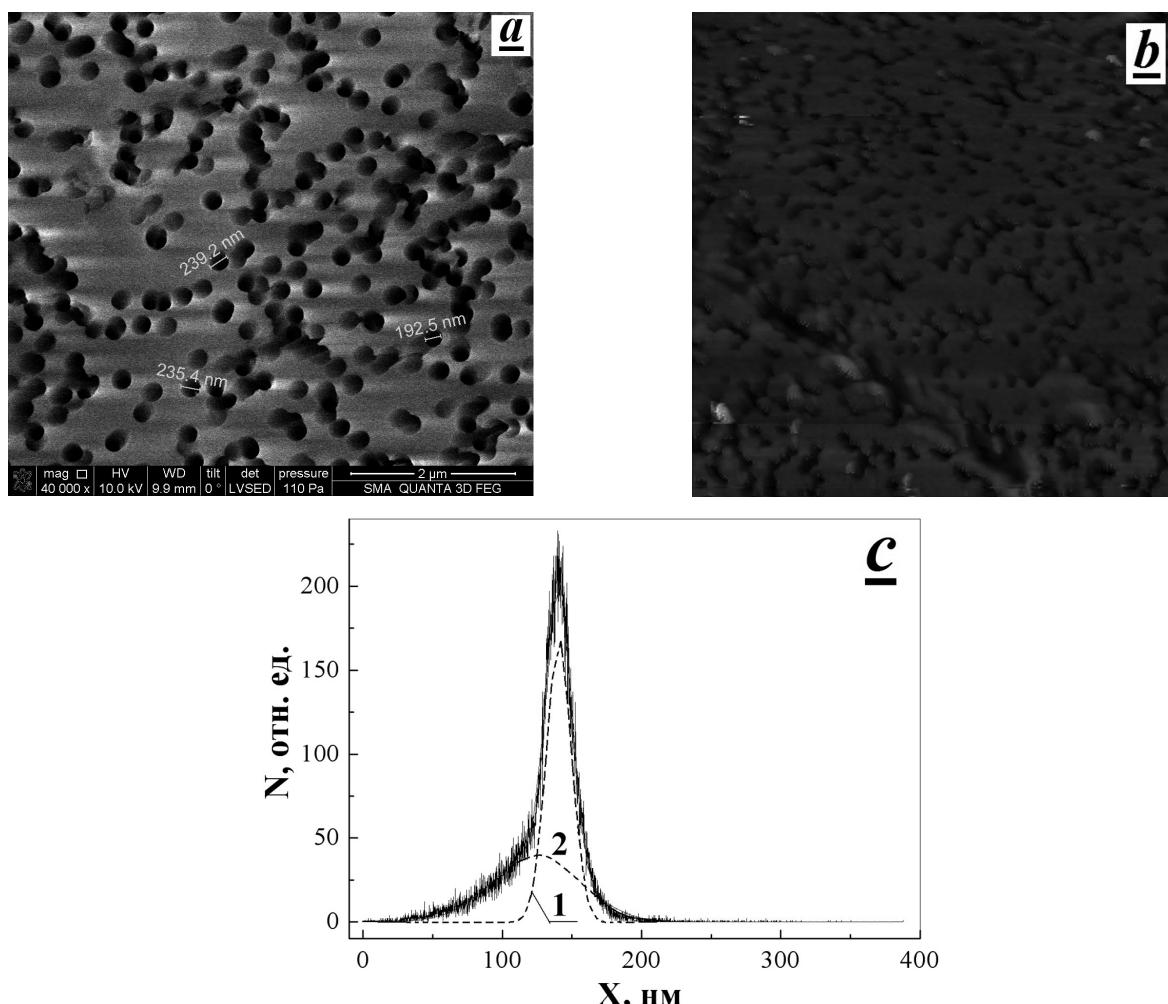


Рис. 4. Электронная микрофотография (а) и изображение поверхности исходного ядерного фильтра, полученное методом атомно-силовой микроскопии (б). Гистограмма распределения по высоте неоднородностей на поверхности ядерного фильтра (с).

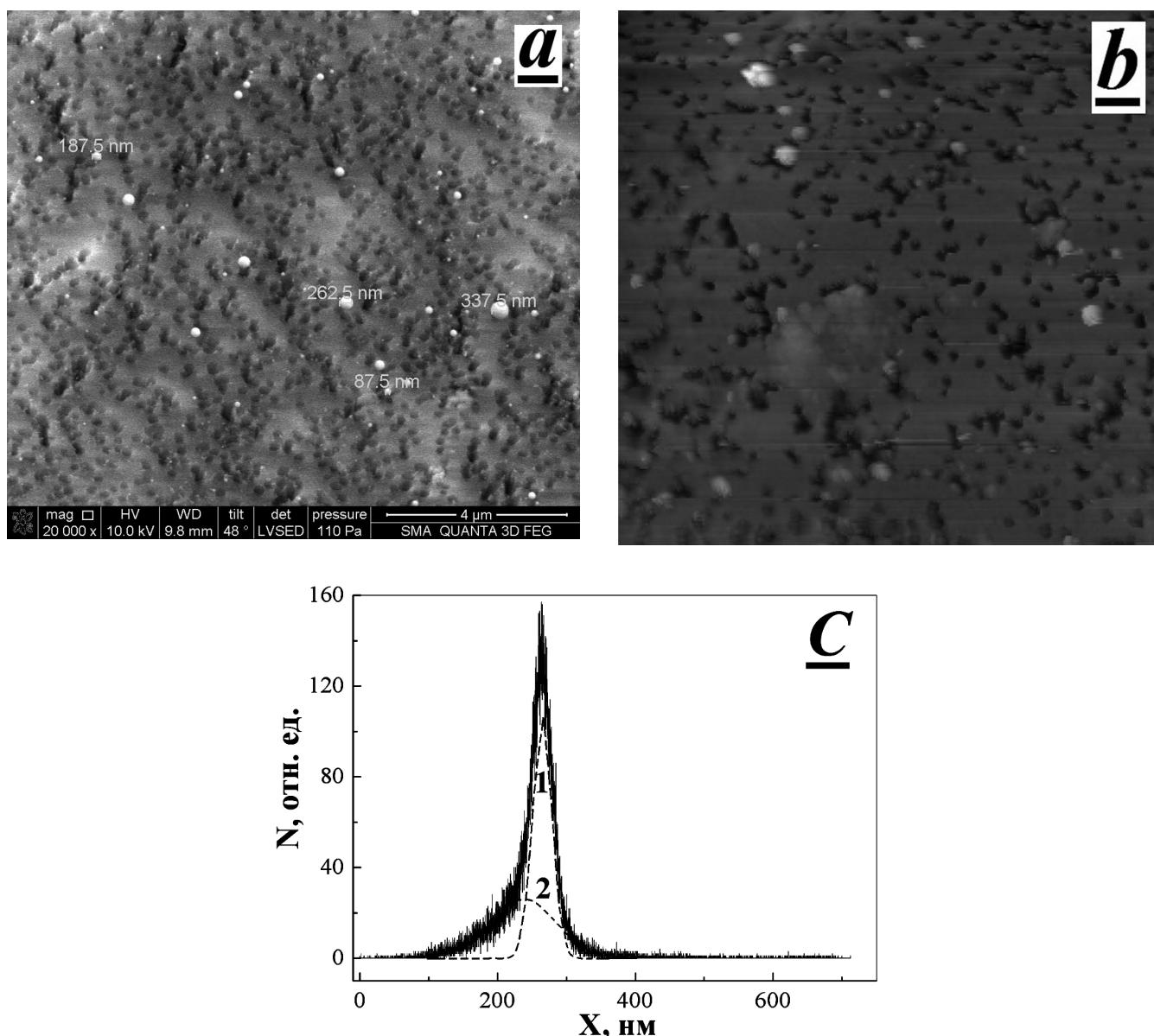
*Electronic micrograph (a) and the image of the surface of the original nuclear filter, obtained by atomic force microscopy (b). Frequency distribution of the height of inhomogeneities on the surface of nuclear filter (c). Peaks (1), (2) constructed in the result of fitting the shape of the histogram.*

Таблица 2

Характеристики шероховатости поверхности образцов ядерных фильтров исходного и после обработки аэрозолями серебра в режимах № 1 - 3, установленные в результате измерений методом атомно-силовой микроскопии (размер исследуемого участка поверхности 10?10 мкм, число сканирований - 256)

Characteristics of the surface roughness of the initial and treated by silver aerosol in the modes N 1 - 3 samples of nuclear filters, established in the result of measurements by the method of atomic-force microscopy (size of the surface area of 10 x 10 microns, the number of scans - 256)

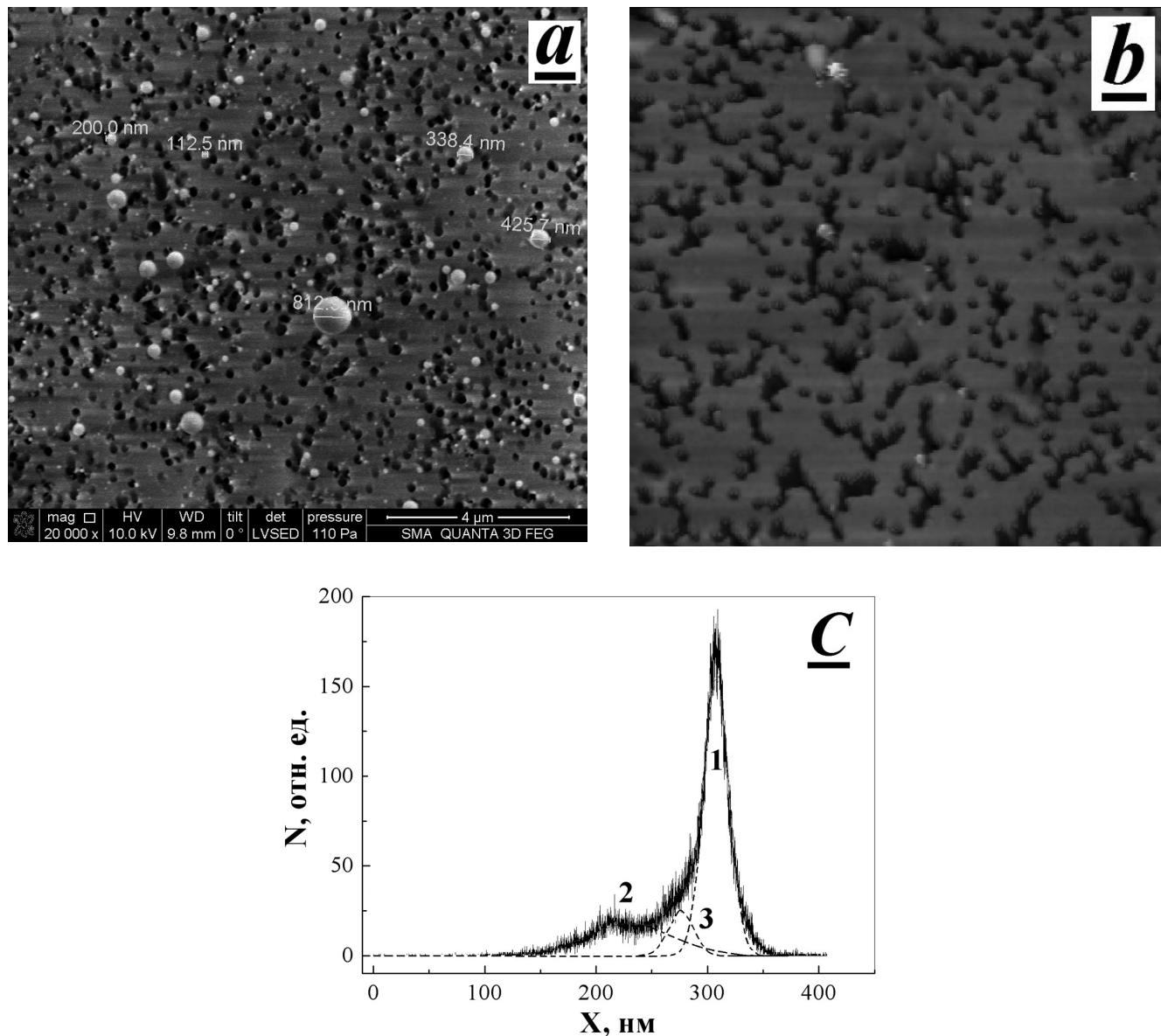
№	Наименование характеристики	Режим обработки			
		исходный	режим 1	режим 2	режим 3
1.	Максимальная высота неоднородности $h_{\max}$ , нм	387,993	678,532	629,43	1040,15
2.	Средняя высота неоднородности $h_c$ , нм	132,083	312,946	360,217	447,387
3.	Средняя шероховатость $S_a$ , нм	17,971	28,342	79,473	107,142
4.	Среднеквадратичное расстояние $S_q$ , нм	25,55	43,70	97,21	134,71



**Рис. 5.** Электронная микрофотография (а) и изображениеnano-/микроструктуры серебра, синтезированной в первом режиме (таблица 1) на поверхности ядерного фильтра, полученное методом атомно-силовой микроскопии (б). Гистограмма распределения по высоте неоднородностей nano-/микроструктуры серебра на поверхности ядерного фильтра (с). Пики (1), (2) построены в результате аппроксимации формы гистограммы.  
**Electron micrograph (a) and image of the silver nano/microstructure, synthesized in the first mode (table 1) on the surface of nuclear filter, obtained by atomic force microscopy (b). Frequency distribution the height of inhomogeneities on the surface of nuclear filter containing the silver nano/microstructure (c). Peaks (1), (2) constructed in the result of fitting the shape of the histogram.**

Увеличение объёмной концентрации частиц серебра в аэрозоле приводит к формированию на поверхности ЯФ nano-/микроструктуры серебра в виде островковой плёнки, состоящей из изолированных nano- и микрочастиц серебра сферической формы размерами от 50 до 800 нм (Рис. 6, а). Из Таблицы 1 можно оценить поверхностную плотность осевших на поверхность ЯФ частиц серебра  $\sim 8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (что соответствует величине  $S_q \sim 35 \text{ нм}$ ). Однако результаты измерений методом РЭМ (Рис. 6, а) и данные таблицы 2 приводят к существенно отличающемуся значению  $S_q \sim 97,2 \text{ нм}$ .

Анализ ACM-изображения Ag-HMC, изготовленной во втором режиме (Рис. 6 б, с), позволил установить, что величина средней высоты неоднородностей и шероховатости поверхности ЯФ с нанесёнными частицами серебра возрастают до 360,22 и 79,50 нм, соответственно (таблица 2). Обнаружено изменение формы гистограммы распределения по высоте неоднородностей на поверхности ЯФ – полученную зависимость удаётся аппроксимировать тремя гауссовыми функциями с максимумами при 307,9 (доминирующий пик), 276,2 и 229,9 нм, соответственно (Рис. 6, с; Таблица 3). Обращает внимание сохранение тенденции к



*Рис. 6. Электронная микрофотография (а) и изображениеnano-/микроструктуры серебра, синтезированной во втором режиме (таблица 1) на поверхности ядерного фильтра, полученное методом атомно-силовой микроскопии (б). Гистограмма распределения по высоте неоднородностей nano-/микроструктуры серебра на поверхности ядерного фильтра (с). Пики (1) - (3) построены в результате аппроксимации формы гистограммы.*  
*Electron micrograph (a) and the image of the silver nano/microstructure, synthesized in the second mode (table 1) on the surface of nuclear filter, obtained by atomic force microscopy (b). Frequency distribution the height of inhomogeneities on the surface of nuclear filter containing the silver nano/microstructure (c). Peaks (1) - (3) constructed in the result of fitting the shape of the histogram.*

Таблица 3

**Результаты аппроксимации распределения по высоте неоднородностей поверхности исходного и обработанных аэрозолями серебра в режимах № 1 - 3 образцов ядерных фильтров.**

**Fitting results for approximation of the distribution of the height of surface heterogeneity on the original and processed by the silver aerosols samples of nuclear filters in the modes № 1 - 3**

Режим обработки	Функция	Номер пика	Характеристики пика				Коэффициент корреляции
			A, отн. ед.	X <sub>0</sub> , нм	h <sub>½</sub> , нм	H, отн. ед.	
исходный	Гауссиан	1	3169,7	124,52	63,93	39,56	0,987
	Гауссиан	2	3823,9	140,52	18,0	169,80	
1	Гауссиан	1	3745,0	264,6	28,02	106,63	0,983
	Гауссиан	2	3106,3	237,42	94,20	26,31	
2	Гауссиан	1	4384	307,9	22,11	158,22	0,978
	Гауссиан	2	694,0	276,22	21,70	25,52	
	Гауссиан	3	1736,9	229,9	77,63	17,85	
3	Гауссиан	1	6929,6	443,9	266,2	20,77	0,881

Примечание: А - площадь пика, X<sub>0</sub> - положение максимума пика; h<sub>½</sub> - ширина на полувысоте; H - высота пика

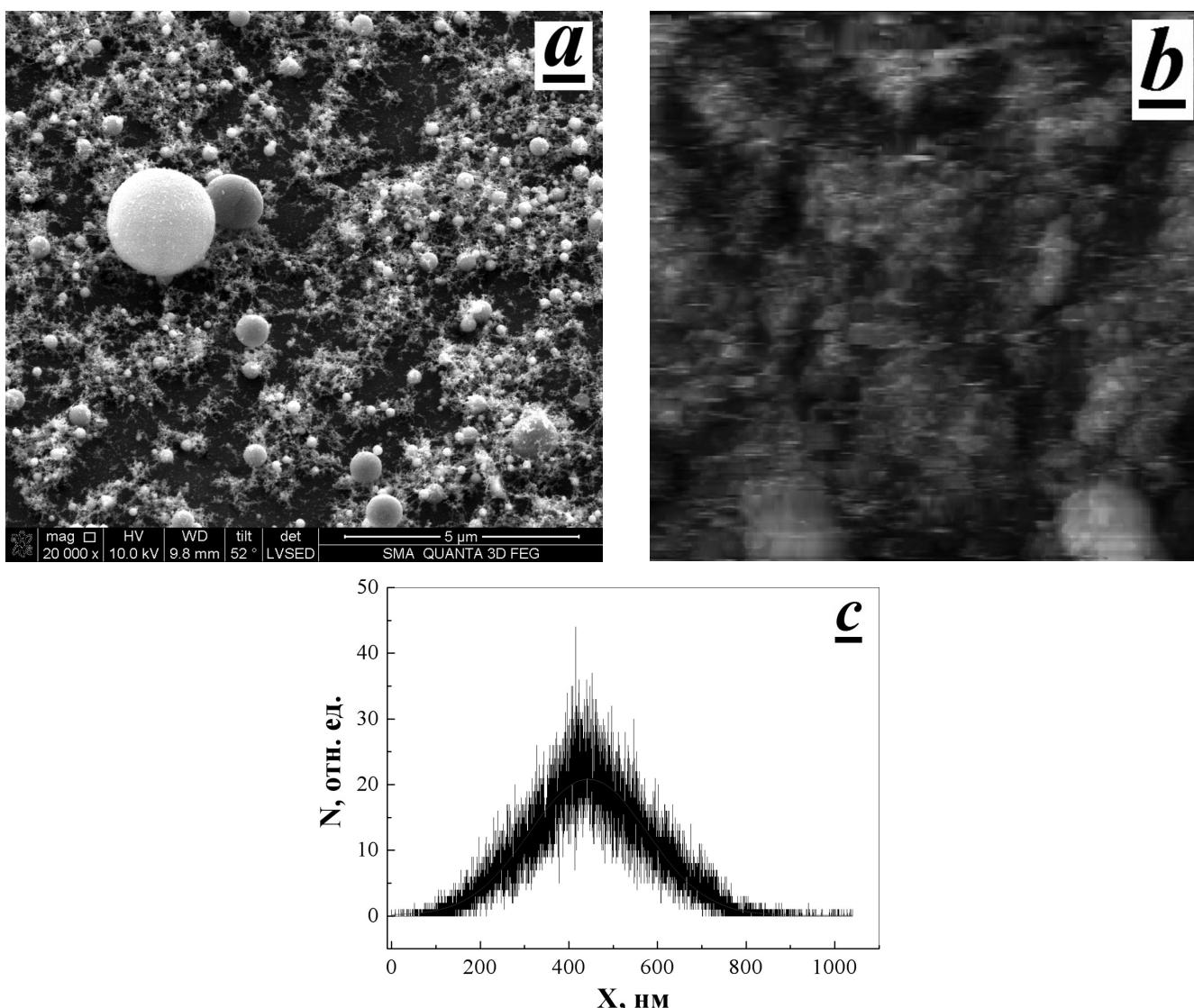
сдвигу максимума распределения в сторону больших размеров поверхностных неоднородностей: в рассматриваемом случае его величина составляет ~160 нм по сравнению с исходным образцом ЯФ. Необходимо также отметить корреляцию в положениях максимумов 2, 3 и максимумов гауссовых функций, аппроксимирующих функцию распределения по высоте неоднородностей для Ag-HMC, синтезированной по первому режиму. Можно сделать вывод, что природа рассматриваемых максимумов может быть обусловлена одним и тем же видом частиц или кластеров частиц серебра.

Значительное расхождение между прогнозными и экспериментально установленными величинами среднеквадратичного расстояния между частицами серебра на поверхности ЯФ, отсутствие в гистограммах Ag-HMC, синтезированных по первому и второму режимам (рисунки 5 с, 6 с, таблица 3), заметного вклада от частиц серебра с размерами от 10 до 100 нм (Рис. 1, 2), позволяет предположить, что в процессе прохождения аэрозоля сквозь ЯФ протекает интенсивная агрегация и кластеризация частиц серебра, как в аэрозоле [4], так и на поверхности ЯФ. Следовательно, сдвиг максимума гистограммы Ag-HMC в сторону больших размеров поверхностных дефектов может быть обусловлен протеканием рассматриваемых процессов.

Тогда дальнейшее увеличение концентрации частиц серебра в аэрозоле будет способствовать интенсификации рассматриваемых процессов коагуляции частиц. Действительно, результаты исследования Ag-HMC, изготовленных в третьем режиме (таблица 1), позволяют сделать вывод о доминирующей роли процессов коагуляции и агрегации частиц серебра, как в аэрозоле, так и на поверхности ЯФ, в формировании Ag-HMC. Согласно результатам измерений методом РЭМ (Рис. 7, а), в этом случае значительная часть поверхности ЯФ оказывается покрытой практически сплошным слоем изnano- и микрочастиц серебра, а также различных структурных образований в виде «цепочек» и кластеров частиц Ag. Интересно отметить, что развитие процессов кластерообразования и образования nano-/микроструктур зависит от вида подложки: наночастицы серебра, осевшие на поверхность микрочастицы размером ~1 мкм (Рис. 7, а), равномерно распределены по поверхности микрочастицы, и не проявляют склонности к кластерообразованию.

Обнаруженное изменение формы Ag-HMC, по сравнению со строением Ag-HMC, изготовленных по первому и второму режимам, является характерным для процессов формирования и роста тонких плёнок [5]. Из АСМ-изображений Ag-HMC (Рис. 7 б, с) следует, что при этом происходит дальнейшее увеличение средней высоты поверхностных неоднородностей и шероховатости поверхности ЯФ (447,4 и 107,1 нм, соответственно (таблица 2)).

В соответствии со сделанным выше предположением, происходит дальнейший сдвиг максимума распределения поверхностных неоднородностей в сторону больших масштабов ~443,9 нм (Рис. 7, с). При этом происходит изменение формы кривой, описывающей распределение по размерам: в этом случае её можно удовлетворительно аппроксимировать одной кривой гауссова типа (Таблица 3).



*Рис. 7. Электронная микрофотография (а) и изображениеnano-/микроструктуры серебра, синтезированной в третьем режиме (таблица 1) на поверхности ядерного фильтра, полученное методом атомно-силовой микроскопии (б). Гистограмма распределения по высоте неоднородностей nano-/микроструктуры серебра на поверхности ядерного фильтра (с).*

*Electron micrograph (a) and the image of the silver nano-/microstructure, synthesized in the third mode (table 1) on the surface of nuclear filter, obtained by atomic force microscopy (b). Frequency distribution the height ofinhomogeneities on the surface of nuclear filter containing the silver nano-/microstructure (c).*

#### 4. Заключение

Таким образом, процессы коагуляции и агрегации частиц серебра, протекающие в аэрозоле, и возможно, на поверхности ЯФ, могут оказывать определяющее влияние на строение образующихся Ag-HMC. Очевидно, с увеличением объёмной концентрации nano- и микрочастиц серебра в аэрозоле возрастает вероятность взаимодействия между ними, что в итоге приводит к изменению строения Ag-HMC от островковой плёнки, состоящей из изолированных частиц серебра, до образования фрагментов сплошного покрытия на поверхности ЯФ. При этом усиливается шероховатость поверхности ЯФ, что может привести к изменению фото- и электрофизических свойств материала [6].

Настоящее исследование было проведено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт от 20 июня 2013 года №14.533.11.0077) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-08-00437; 14-07-00025; 14-03-00507).

#### **Библиографический список**

1. Гусев А.И., *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. - М.: Физматлит, 2009. - 414 с.
2. Мchedлишвили Б.В., Виленский А.И., Олейников В.А., Васильев А.Б., Ядерные фильтры и структуры на их основе, в кн.: *Физическая кристаллография*, М.: Наука, 1992. С. 43 – 58.
3. Загайнов В.А., Диффузионный спектрометр для диагностики наночастиц в газовой фазе, *Нанотехника*, 2006, Т. 1. С. 141 – 146.
4. Кирш В.А., Осаждение субмикронных аэрозольных частиц в фильтрах из ультратонких волокон, *Кolloidnyj zhurnal*, 2004, Т. 66, № 3. С. 352 – 357.
5. Грегор Л.В., Получение тонких плёнок методом осаждения из газовой фазы / в кн.: *Физика тонких плёнок*: Том 3 / под ред. Г. Хасса, М.: Книга по требованию, 2012. 332 с.
6. Топорец А.С., *Оптика шероховатой поверхности*, Л.: Машиностроение, 1988, 191 с.

#### **References**

1. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostructury, nanotechnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 414 p.
2. Mchedlishvili B.V., Vilenskii A.I., Oleynikov V.A., Vasil'ev A.B. Nuclear filters and structures on their basis. in: *Physicheskaya cristallographiya* [Physical crystallography], Moscow, Nauka Publ., 1992. pp. 43 – 58
3. Zagaynov V.A. Diffusion spectrometer for the diagnosis of nanoparticles in the gas phase. *Nanotekhnika – Nanotehnika*, 2006, vol. 1. pp. 141 – 146 (in Russian)
4. Kirsh V.A. Deposition of submicron aerosol particles in filters from ultrafine fibers. *Kolloidnyii zhurnal – Colloidal Journal*, 2004, vol. 66, no. 3. pp. 352 – 357 (in Russian).
5. Gregor L.V. Obtaining thin films by the method of deposition from the gas phase. in: *Physika tonkikh plenok*: Tom 3. pod red. G. Hassa [in: Physics of thin films: Volume 3. ed. by G. Hass]. Moscow, «Kniga po trebovaniyu» Publ., 2012. 332 p.
6. Toporets A.S. Optika sherokhovatoi poverkhnosti [Optics rough surface]. Leningrad, «Mashinostroenie» Publ., 1988. 191 p.

#### **Сведения об авторах**

**А.С.Смолянский<sup>1</sup>:** канд. хим. наук, вед. научный сотрудник лаб. электрохимии Открытого акционерного общества Государственный научный центр Российской Федерации «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова», Москва, Россия, assa@nifhi.ru, тел. +7(905) 748 75 28.

**В.А.Загайнов:** д-р физ.-мат. наук, проф., кафедры общей физики НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, zagaynov@cc.nifhi.ac.ru, тел. +7(495) 917 89 04.

**Ю.Г.Бирюков:** ведущий инженер лаборатории физики аэродисперсных процессов Открытого акционерного общества Государственный научный центр Российской Федерации «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова», Москва, Россия, biryukov\_y\_g@mail.ru, тел. +7(495) 917 89 04.

**Э.П.Магомедбеков:** канд. хим. наук, доц., директор Института материалов современной энергетики и нанотехнологий Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия, elder@rctu.ru, тел. +7(495) 948 91 08.

**О.Г.Степанова:** генеральный директор ООО «ЭКОСХИМ-ХТ», Москва, Россия, o.ssotel@mail.ru, тел. +7(495) 495-24-26.

**Л.И. Трахтенберг:** д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр. Открытого акционерного общества Государственный научный центр Российской Федерации «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт имени Л.Я. Карпова», Москва, Россия, trakh@cc.nifhi.ac.ru, +7(495) 916 12 09.

<sup>1</sup> Контактное лицо