1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ, НАНОСИСТЕМ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

УДК 539.216.2:546.74:539.211 *Оригинальная статья*

Размерный эффект при формировании фрактальных пленок никеля

В.А. Анофриев[1], А.С. Антонов[1], Е.М. Семенова[1], М.С. Афанасьев[2,3], Н.Ю. Сдобняков[1]

[1]*ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»*
170002, Россия, Тверь, Садовый пер., 35
[2]*Фрязинский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»*
141190, Россия, Московская область, Фрязино, пл. Введенского, 1
[3]*ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»*
119454, Россия, Москва, пр-кт Вернадского, 78
nsdobnyakov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.007

Аннотация: В данной работе на примере наноразмерных пленок никеля (толщиной 50-100 нм) исследован размерный эффект для описания закономерностей формирования фрактального рельефа. Были использованы два альтернативных метода получения изображений – атомно-силовая микроскопия и сканирующая туннельная микроскопия. На основе анализа серий изображений на масштабе 500 нм, обеспечивающем одновременно наилучшее разрешение поверхности образца и качество изображения для обеих методик, получены размерные зависимости фрактальной размерности от толщины пленки. Описаны особенности формирования фрактального рельефа в зависимости от расположения на поверхности исследуемого участка пленки на основе одновременного использования двух методик: за счет изменения толщины пленки и за счет определенного, статистически одинакового выбора областей пленки никеля. Нелинейное изменение фрактальной размерности для пленок никеля с ростом их толщины может быть объяснено двумя параллельными процессами – формированием «нового» фрактального рельефа и деградацией «сформированного» фрактального рельефа в процессе напыления, что отличает данный эффект от таких классических размерных эффектов в наноразмерных пленках, как зависимость температуры плавления от толщины.

Ключевые слова: размерный эффект, деградация и рост, атомно-силовая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия, фрактальный рельеф, пленки никеля.

Анофриев Виталий Александрович – аспирант 4 года обучения кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Антонов Александр Сергеевич – к.ф.-м.н., научный сотрудник ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Афанасьев Михаил Сергеевич – д.т.н., доцент, профессор, ведущий научный сотрудник Фрязинского филиала ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»; профессор кафедры метрологии и стандартизации ФГБОУ ВО «МИРЭА – российский технологический университет»
Сдобняков Николай Юрьевич – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Original paper

Size effect in the formation of fractal nickel films

V.A. Anofriev[1], A.S. Antonov[1], E.M. Semenova[1], M.S. Afanasiev[2,3], N.Yu. Sdobnyakov[1]

[1]*Tver State University, Tver, Russia*
[2]*Fryazino Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino, Russia*
[3]*MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.007

Abstract: In this paper, we examine the size effect to describe the patterns of fractal relief formation

© В.А. Анофриев, А.С. Антонов, Е.М. Семенова, М.С. Афанасьев, Н.Ю. Сдобняков, 2026

using nanoscale nickel films (50-100 nm thick). Two alternative imaging methods were employed: atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy. By analyzing a series of images at a scale of 500 nm, which provides the best surface resolution and image quality for both methods, we obtained the size dependences of the fractal dimension on film thickness. We have described the formation of fractal relief depending on the location of the studied region on the film surface using both methods: varying the film thickness and selecting specific, statistically identical regions of the nickel film. The non-linear change in the fractal dimension for nickel films with increasing thickness can be explained by two parallel processes: the formation of a «new» fractal relief and the degradation of the «formed» fractal relief during the deposition process, which distinguishes this effect from some classical dimensional effects for nanoscale films, for example, the dependence of their melting temperature on thickness.
Keywords: size effect, degradation and growth, atomic force microscopy, scanning tunneling microscopy, fractal relief, nickel films.

Vitaly A. Anofriev – 4th year postgraduate student, General Physics Department, Tver State University
Alexander S. Antonov – Ph. D., Researcher, Tver State University, ORCID: 0000-0003-1709-8078
Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University, ORCID: 0000-0003-2755-6933
Mikhail S. Afanasiev – Dr. Sc., Docent, Professor, Leading Researcher, Fryazino Branch of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS; Professor, Department of Metrology and Standardization, MIREA – Russian Technological University, ORCID: 0000-0001-5475-8616
Nickolay Yu. Sdobnyakov – Dr. Sc., Docent, Professor, General Physics Department, Tver State University, ORCID: 0000-0003-1749-0336

Поступила в редакцию/received: 01.05.2026; после рецензирования/revised: 21.06.2026; принята/accepted: 25.06.2026.

1. Введение

В настоящее время фундаментальные исследования поверхности тонких металлических пленок с применением аппарата фрактальной геометрии проводятся, как правило, с использованием возможностей атомно-силовой и туннельной микроскопии [1-15]. И хотя сама идея описания поверхности с помощью аппарата фрактальной геометрии не является новой [16, 17], но лишь в последние десятилетия практический интерес стал превалировать над фундаментальными исследованиями [18]. В то же время в работах [8-15] мы неоднократно подчеркивали практическую важность разработки технологий направленного синтеза фрактальных структур с заданными параметрами фрактальной размерности и высотными параметрами. При этом согласно работам [1, 2] данный показатель служит эффективным критерием для оценки степени развитости микро- и нанорельефа шероховатых поверхностей.

Поскольку очевидно, что определяющую роль для различных практических применений наносистем, включая наноразмерные по толщине пленки, играет структура их поверхности, в данной работе на примере наноразмерных пленок никеля будет рассмотрен размерный эффект формирования фрактального рельефа, который обусловлен как ростом толщины пленки, так и одновременной деградацией рельефа.

2. Постановка задачи

Для удобства читателя далее мы повторим подробно изложенную ранее в [19] методику подготовки образцов. В [14] обосновывается применение комплексного подхода, который заключается в одновременном использовании результатов, полученных альтернативными методами исследования поверхности: сканирующей туннельной (СТМ, Умка, Концерн Наноиндустрия) и атомно-силовой микроскопии (АСМ, SolverNext, НТ-МДТ). Такое применение обусловлено, с одной стороны, принципиально разными подходами к получению изображений поверхности, а с другой стороны – зависимостью точности воспроизведения рельефа как от масштаба съёмки, так и от материала.

Наноразмерные никелевые пленки наносились на слюду, которая обладает ювелирной поверхностью (т.е. весьма совершенной спайностью в базовой плоскости) и не влияет на процесс формирования рельефа, методом магнетронного распыления на установке Cressington 208HR. Физическое осаждение материала мишени происходило за счет ее бомбардировки ионами рабочего газа (аргона ОСЧ), генерируемыми в локализованной около мишени плазме тлеющего разряда. Для достижения высокой однородности покрытий применялась вращательно-планетарно-наклонная (R-P-T) платформа, обеспечивающая многоугольное перемещение подложек. Контроль заданной толщины слоев осуществлялся с помощью прецизионного контроллера Cressington MTM-20. Перед началом процесса рабочую камеру вакуумировали и продували аргоном; напыление проводилось при давлении 0,1 мбар и токе 80 мА. В результате была синтезирована серия образцов толщиной 50, 65, 80, 90 и 100 нм. Морфологические особенности поверхности полученных пленок детально изучались методами АСМ и СТМ.

3. Результаты и обсуждение

Размерный эффект для фрактальных пленок никеля в данной работе предложено исследовать двумя методиками: 1) за счет изменения толщины пленки (впервые были исследованы пленки пяти значений толщины); 2) за счет определенного, статистически одинакового выбора областей пленки никеля (см. рис. 1). Второй способ был апробирован для ряда металлов [8-15, 19] и наиболее эффективен в том случае, если рельеф поверхности существенно отличается от типа «плато» [14] как вследствие особенностей формирования рельефа в конкретных экспериментальных условиях, так и за счет несовершенства конкретной технологии напыления. Это, собственно, подтверждается типовым изображением пленок никеля, которое приведено на рис. 1.

Статистически важно иметь большой набор изображений

поверхности для каждой исследуемой толщины пленки, а также для используемой методики исследования поверхности: АСМ и СТМ. На рис. 2 и 3 нами представлены «типичные» наблюдаемые поверхности на масштабе 500 нм, хотя это не единственный масштаб, на котором проведены исследования (100, 300 и даже 1000 нм). Выбор обусловлен возможностью получения качественных изображений поверхности и детализацией особенностей рельефа на всей поверхности образца. Отметим, что, во-первых, анализ рис. 2 и 3 выявляет разную степень детализации рельефа (хотя мы понимаем, что это разные области сканирования). Во-вторых, цветовая идентификация размерного эффекта (именно динамика ее изменения) также различна. Даже визуально понятно, что для пленок никеля поверхность неоднородна даже при наименьшей толщине пленки, т.е. различные участки обладают различной степенью развитости рельефа, что, как будет показано далее, влияет на значения фрактальной размерности.



а б

Рис. 1. К методике определения фрактальной размерности различных участков поверхности пленки никеля (толщиной 50 нм, масштаб изображения 1000 нм, АСМ): а – равномерное покрытие сеткой квадратов всей поверхности пленки; б – рост «поля» оценки фрактальной размерности от центра пленки к ее краям. Изображение обработано в ПО [20].

В Таблицах 1 и 2 представлены результаты оценки фрактальной размерности, выполненные по сериям изображений (в итоге были выбраны два эталонных образца с наименьшим количеством шумов на изображениях, в том числе на различных масштабах), полученных с использованием СТМ и АСМ. В качестве метода оценки фрактальной размерности использовался метод включающих окон (Enclosing Boxes) в ПО [20]. Представленные данные позволяют провести оценку локальной неоднородности поверхности. Из данных СТМ следует, что для толщины 50 нм характерен диапазон значений 2,19-2,62; для 90 нм – 2,35-2,88 и для 100 нм – 2,35-2,76 соответственно. Так по данным АСМ для образца с толщиной 50 нм значения лежат примерно в диапазоне 2,10-2,64; для 90 нм – 2,24-2,82 и для 100 нм – 2,31-2,76 соответственно. Таким образом, с увеличением толщины пленок степень «развитости» фрактального рельефа сначала увеличивается, но при достижении наноразмерного предела

(100 нм) идентифицируется деградация фрактального рельефа, т.е. уменьшение значения фрактальной размерности. Можно отметить, что диапазоны значений близки при использовании методов СТМ и АСМ, а при толщине 100 нм верхняя граница значений фрактальной размерности находится в идеальном согласии. Отметим здесь, что погрешность значений с учетом анализа серий изображений не превышает 0,02-0,03. Еще один вывод о поведении фрактальной размерности можно сделать из сравнения областей «БК» и «Образец»: значения фрактальной размерности для области «БК», как правило, все-таки ниже чем для области образца в целом. По-видимому, это связано с тем, что при увеличении площади анализа начинают учитываться дополнительные детали поверхности. В то же время возможное отклонение от такой зависимости для фрактальной размерности говорит о том, что локальные особенности поверхности, полученные в результате анизотропности напыления, могут существенно влиять на её значения при использовании методологии, представленной на рис. 1. В частности, это говорит о том, что крупномасштабная структура изображения для пленки никеля может быть менее развитой, чем ее локальные области. Нами замечено, что при использовании СТМ лучше выявляются отдельные локальные участки с высокоразвитым рельефом, но они не формируют самоподобную структуру всей поверхности. Это подтверждается данными из работ [10, 19], в которых впервые было описано, что СТМ лучше фиксирует небольшие локальные неоднородности поверхности металлических пленок. Таким образом, в некотором приближении можно сделать вывод о том, что АСМ лучше идентифицирует такой рельеф, который обладает выраженной самоподобной организацией на разных масштабах (даже на микроуровне 1000-2000 нм), в то время как СТМ следует применять, если локально «сложные» (развитые с точки зрения фрактальной морфологии) участки распределены по поверхности неравномерно и, соответственно, уже не определяют свойства всей исследуемой области образца.

В данной работе именно для оценки размерного эффекта мы исследовали представленные на рис. 2-3 изображения (т.е. образец в целом). Можно обратить внимание на степень детализации структурных элементов поверхности пленок никеля (зёрен) при использовании двух методов АСМ и СТМ (см. рис. 2 е и 3 е), что говорит в пользу комплексного анализа поверхности и будет также исследовано нами далее.

На рис. 4 соответствующие зависимости приведены для двух реализованных в ПО [20] методов: Enclosing Boxes (метод включающих окон) и Morphological Envelopes (метод морфологических огибающих). Важно отметить, что оба метода СТМ и АСМ в целом одинаково описывают тенденцию изменения фрактальной размерности при

изменении толщины пленки. Различия в конкретных значениях обусловлены отмеченными выше факторами, связанными с физической природой методов.

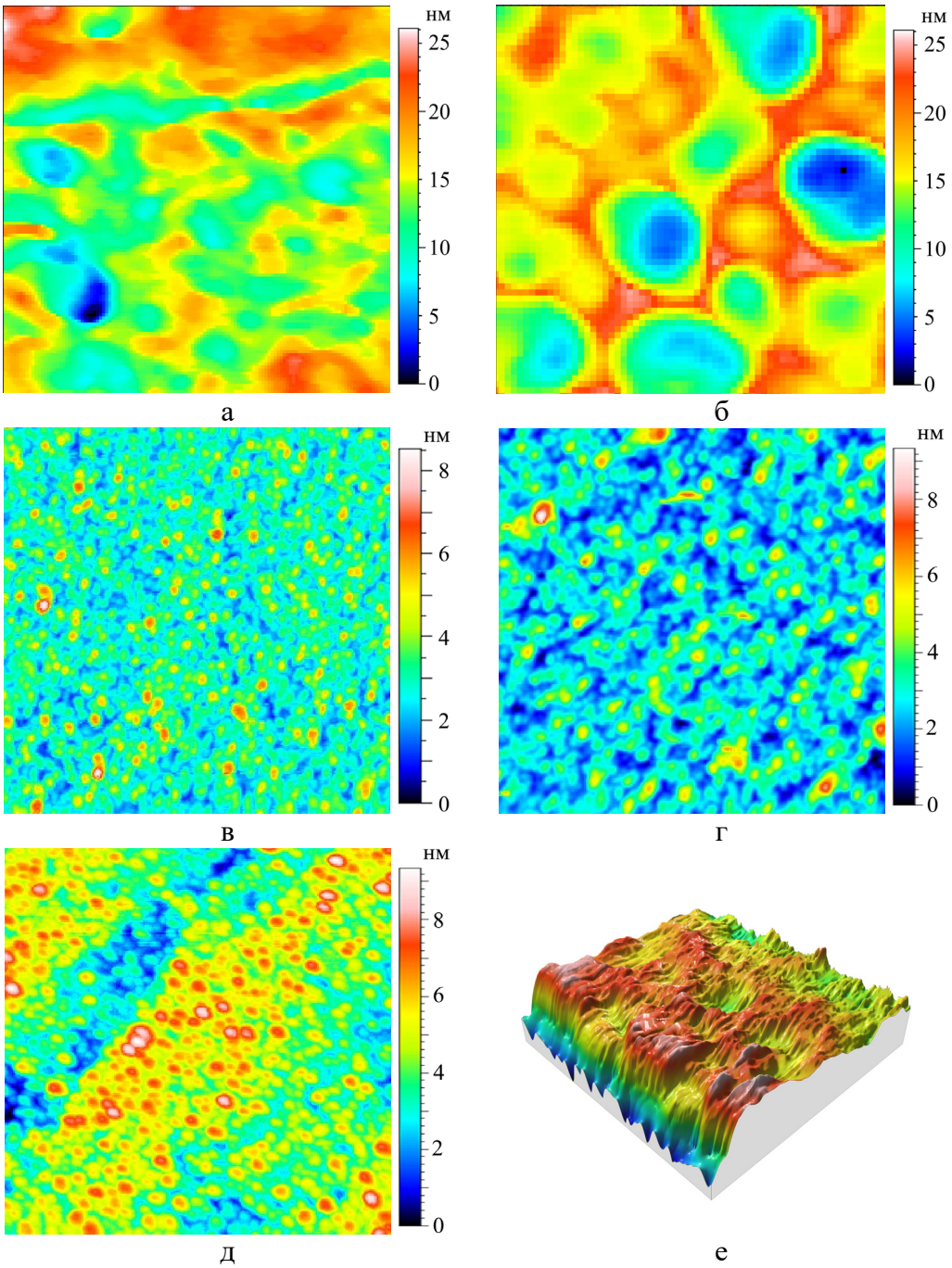

Рис. 2. Фотографии никеля, полученные при помощи АСМ, для различных толщин пленки: а – 50 нм, б – 65 нм, в – 80 нм, г – 90 нм, д – 100 нм, е – трехмерное изображение образца панели а. Масштаб изображений 500 нм.

Вместе с тем важно использовать не только разные методы получения изображений при одинаковой методике их обработки, например, в ПО [20], но и разные методы оценки фрактальной

размерности. Такой подход в какой-то мере позволяет учитывать эффект геометрической анизотропии, т.к. очевидно, что рельеф поверхности развивается по вертикали иначе, чем по горизонтали (хотя данный эффект в наших работах мы не анализировали), но это подтверждается в компьютерных экспериментах [21]. Кроме того, разная природа «шума» на изображениях является фактором, говорящим в пользу использования нескольких методов для оценки фрактальной размерности.

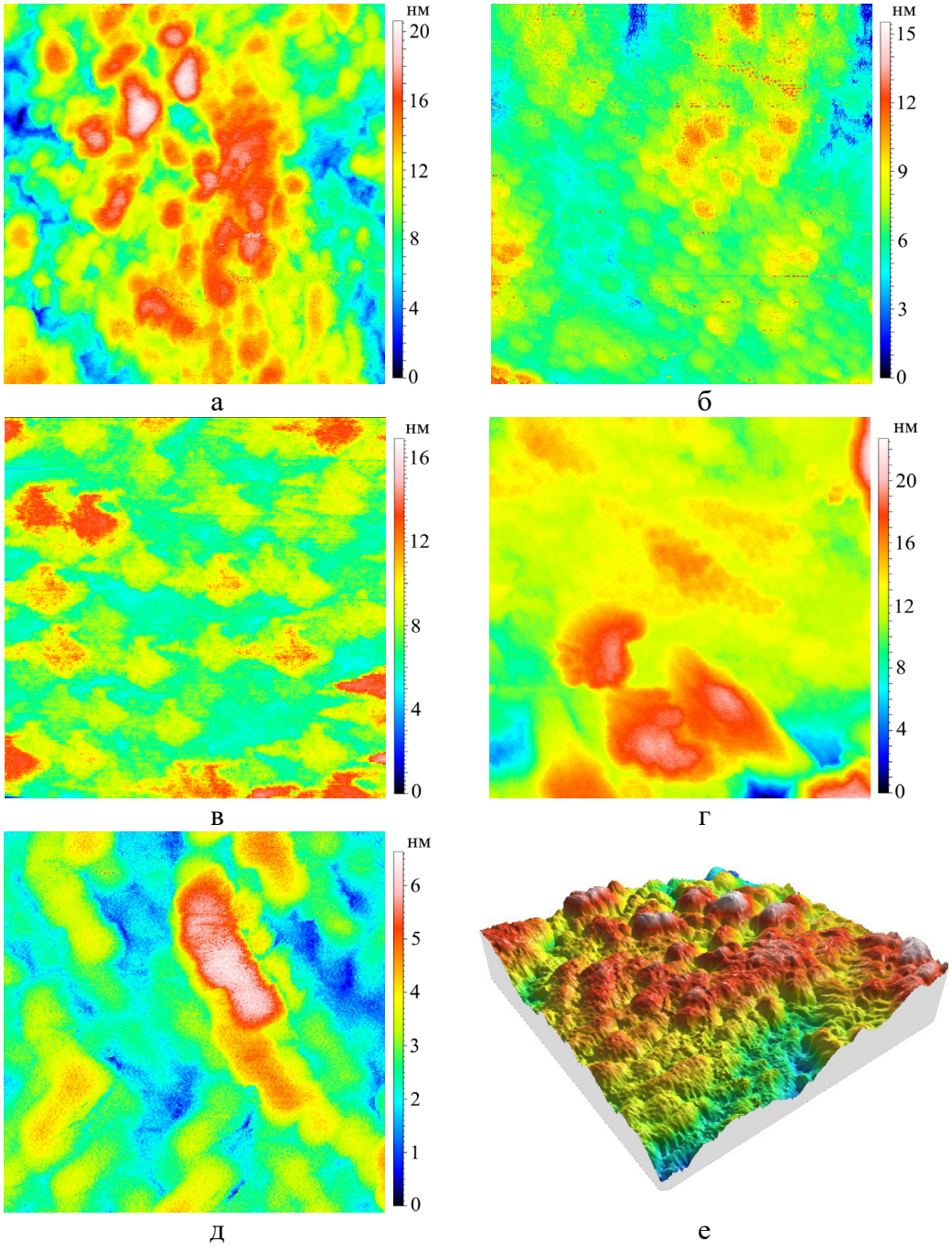

Рис. 3. То же с использованием СТМ.

Таблица 1. Фрактальная размерность различных областей фотографий никеля, полученных при помощи СТМ* (значение «БК» отвечает участку большого квадрата на рис. 1 б, значение «Образец» – всей поверхности пленки на рис. 1 б).

Толщина	50нм		65нм		80нм		90нм		100нм	
Номер квадрата / Номер образца	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	2,52	2,34	2,72	2,72	2,52	2,62	2,54	2,55	2,58	2,38
2	2,33	2,37	2,57	2,80	2,60	2,50	2,51	2,80	2,52	2,42
3	2,56	2,27	2,55	2,84	2,45	2,37	2,64	2,69	2,68	2,59
4	2,33	2,42	2,50	2,63	2,75	2,51	2,48	2,77	2,59	2,65
5	2,43	2,41	2,50	2,88	2,70	2,65	2,53	2,79	2,69	2,44
6	2,58	2,32	2,63	2,74	2,76	2,63	2,63	2,88	2,48	2,65
7	2,28	2,19	2,67	2,70	2,86	2,50	2,48	2,76	2,69	2,44
8	2,60	2,42	2,71	2,89	2,68	2,71	2,35	2,77	2,57	2,44
9	2,50	2,62	2,63	2,74	2,60	2,58	2,36	2,58	2,76	2,35
БК	2,48	2,38	2,54	2,62	2,63	2,57	2,36	2,72	2,42	2,61
Образец	2,42	2,20	2,60	2,73	2,64	2,58	2,81	2,70	2,54	2,61

* данные для метода включающих окон.

Таблица 2. Фрактальная размерность различных областей фотографий никеля, полученных при помощи АСМ*. Обозначения соответствуют Таблице 1.

Толщина	50нм		65нм		80нм		90нм		100нм	
Номер квадрата / Номер образца	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	2,11	2,13	2,38	2,37	2,41	2,56	2,31	2,78	2,31	2,76
2	2,32	2,19	2,36	2,55	2,41	2,52	2,26	2,51	2,33	2,48
3	2,28	2,42	2,36	2,48	2,42	2,52	2,66	2,47	2,33	2,47
4	2,18	2,21	2,36	2,39	2,50	2,54	2,35	2,46	2,35	2,39
5	2,32	2,42	2,31	2,36	2,46	2,60	2,33	2,52	2,71	2,32
6	2,40	2,38	2,34	2,37	2,46	2,60	2,30	2,43	2,40	2,37
7	2,10	2,24	2,60	2,33	2,43	2,51	2,24	2,42	2,36	2,36
8	2,23	2,42	2,33	2,40	2,44	2,75	2,27	2,53	2,58	2,32
9	2,28	2,39	2,26	2,28	2,32	2,50	2,42	2,44	2,31	2,51
БК	2,46	2,55	2,62	2,64	2,69	2,74	2,57	2,68	2,62	2,66
Образец	2,46	2,64	2,50	2,69	2,81	2,82	2,82	2,77	2,70	2,70

* данные для метода включающих окон.

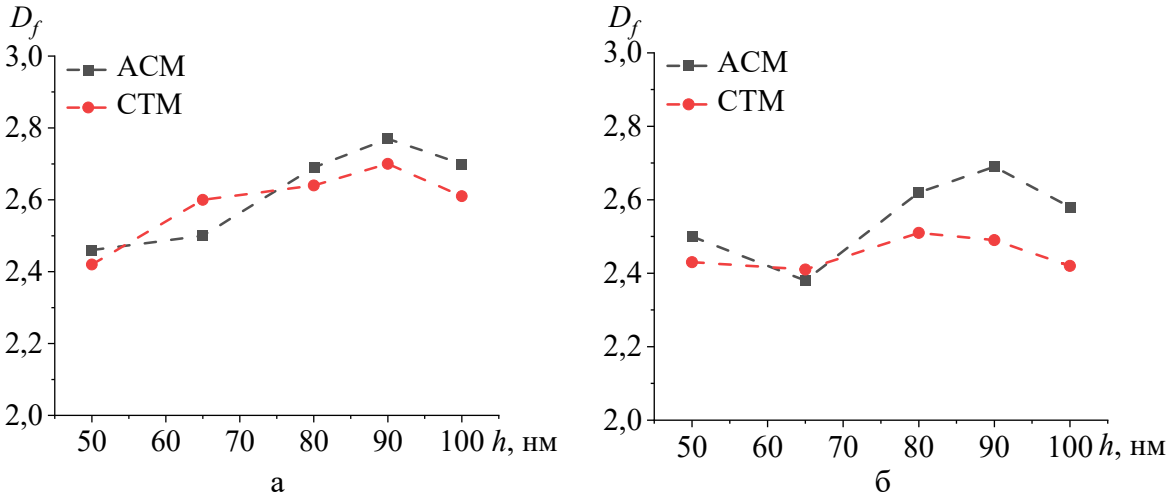

Рис. 4. Зависимость фрактальной размерности от толщины образца никеля: а – метод включающих окон, б – метод морфологических огибающих. Масштаб 500 нм.

Метод включающих окон пытается «втиснуть» эту анизотропию в изотропные кубы, из-за чего линейный график скейлинга $\ln(N(\varepsilon)) - \ln(1/\varepsilon)$ изгибается, а область корректной линейной аппроксимации (non-scale zone) может существенно сужаться. С другой стороны, по сути метод морфологических огибающих за счет гибкого изменения объема оболочки отлично адаптируется к самоаффинным поверхностям, давая более стабильное и физически обоснованное значение размерности, т.е. изменение радиуса структурного элемента адаптируется под вытянутую форму нанозерен. Однако на данном этапе в силу функциональной ограниченности приборов, реализующих АСМ и СТМ методики, невозможности контроля процесса окисления металлических пленок (поэтому, как правило, используются металлы с низкой скоростью окисления поверхности при комнатной температуре, такие как молибден [8, 12, 13]) необходимо использовать несколько методик оценки фрактальной размерности и, как правило, сравнивать не конкретные значения, а диапазоны значений, а также тенденции их изменения, в частности при изменении площади образца и/или толщины пленки. Таким образом, предложенная методика адекватно идентифицирует закономерности формирования фрактального рельефа для наноразмерных пленок никеля.

В качестве поискового исследования нами была проведена оценка зерен (агломератов) на поверхности пленок никеля на различных масштабах (см. рис. 5). Результаты выглядят вполне логичными. Так, данные СТМ с уменьшением масштаба изображения фиксируют все более мелкие зерна, при этом сложность рельефа уменьшается, но до некоторого, по-видимому, предельного значения 2,3. Как уже отмечалось выше, АСМ менее чувствителен и для лучшей визуализации необходимо иметь ярко

выраженный многоуровневый по организации рельеф и сохранение самоподобия. В случае АСМ распределения фактически слабо разделяются по размерам зёрен, а смещение распределения, отвечающего масштабу 100 нм, в область размеров 16-26 нм, как раз говорит о невысоком разрешении поверхности, как по числу структурных элементов, так и по их размеру. Вместе с тем, требует дополнительного исследования тот факт, что число структурных элементов на масштабе 500 нм в диапазоне размеров 8-12 нм отличается на 50%, а в диапазоне 12-16 нм СТМ практически не фиксирует таких зерен. Возможно, алгоритм ПО [20] не справляется с идентификацией непрерывных выступов и лакун (см. в сравнении рис. 2 е и 3 е), при этом очевидно, что локальная структура пленки именно при использовании СТМ метода визуально воспроизводится лучше (с более высоким разрешением по перепадам высот структурных элементов).

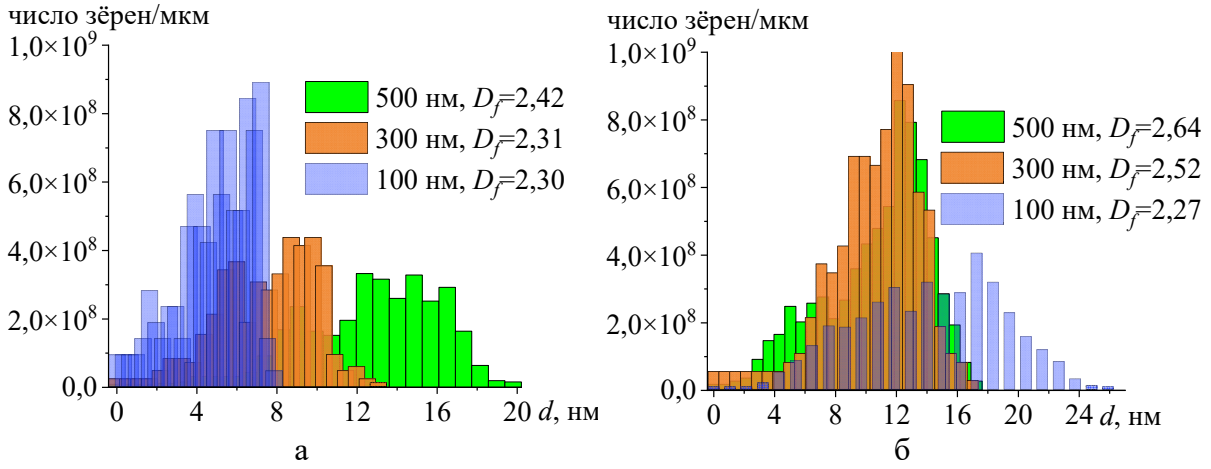

Рис. 5. Плотность структурных элементов поверхности (зерён) пленки никеля толщиной 50 нм на различных масштабах: а – СТМ, б – АСМ, типичные трехмерные изображения представлены на рис. 2 е и 3 е.

4. Заключение

В результате проведенного исследования на примере наноразмерных пленок никеля (толщиной 50-100 нм) был изучен размерный эффект, определяющий закономерности формирования фрактального рельефа поверхности в процессе магнетронного напыления. На основе сравнительного анализа серий изображений, полученных методами атомно-силовой и сканирующей туннельной микроскопии на едином масштабе сканирования 500 нм (обеспечивающем оптимальный баланс пространственного разрешения и качества визуализации для обеих методик с учетом шумов, характерных для методов СТМ и АСМ [22]), установлены размерные зависимости фрактальной размерности от толщины покрытий. Таким образом, фрактальные свойства поверхности

могут влиять и на электрические свойства, в частности на вольтамперную характеристику контакта зонд-образец [10, 23].

Совместное использование АСМ и СТМ методик позволило описать топологические особенности наноструктурированного рельефа в зависимости от пространственного расположения исследуемых участков при статистически эквивалентном выборе областей сканирования. Обнаруженный нелинейный характер изменения фрактальной размерности никелевых пленок с ростом их толщины обусловлен постоянной конкуренцией двух параллельно протекающих процессов, а именно процессом зарождения «нового» и процессом деградации («высотным» сглаживанием и, следовательно, упрощением) уже «сформированного» фрактального рельефа в ходе магнетронного осаждения. Данный механизм принципиально отличает выявленную закономерность от «классических» монотонных размерных эффектов в тонких пленках (например, температуры плавления [24, 25]). Отметим, что даже никелевая фольга со слабовыраженными фрактальными свойствами (значение фрактальной размерности 2,28 в пересчете на поверхность с использованием уравнения связи [26]) может найти практическое применение в качестве электрокатализатора [27]. В нашей работе с использованием метода магнетронного напыления удалось идентифицировать локальные структуры со значением фрактальной размерности 2,88 при толщине 90 нм методом СТМ, а на всей поверхности для того же образца значение составило 2,7. В то время как для той же толщины 90 нм методом АСМ зафиксировано значение 2,82. Данный результат говорит о том, что для пленок никеля толщиной до 100 нм можно сформировать высокоразвитый фрактальный рельеф на масштабе 500 нм, тогда как для порошков никеля с развитой поверхностью (размером 250-260 мкм) удавалось получить лишь значение фрактальной размерности до 2,36 в пересчете на поверхность [28].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственной программы в области научно-исследовательской деятельности (проект № 0817-2026-0006).

Библиографический список:

1. **Иванов, Г.С.** Фрактальная геометрическая модель микроповерхности / Г.С. Иванов, Ю.В. Брылкин // Геометрия и графика. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 4-11. DOI: 10.12737/18053.
2. **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.
3. **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.
4. **Van Put, A.** Quantitative characterization of individual particle surfaces by fractal analysis of scanning electron microscope images / A. Van Put, A. Vertes, D. Wegrzynek et al. // Fresenius' Journal of Analytical

Chemistry. – 1994. – V. 350. – I. 7-9. – P. 440-447. DOI: 10.1007/BF00321787.
5. **Mannelquist, A.** Influence of tip geometry on fractal analysis of atomic force microscopy images / A. Mannelquist, N. Almquist, S. Fredriksson // Applied Physics A. – 1998. – V. 66. – Supplement I. 1. – P. S891-S895. DOI: 10.1007/s003390051262.
6. **Douketis, C.** Rough silver films studied by surface enhanced Raman spectroscopy and low temperature scanning tunnelling microscopy / C. Douketis, T.L. Haslett, Z. Wang et al. // Progress in Surface Science. – 1995. – V. 50. – I. 1-4. – P. 187-195. DOI: 10.1016/0079-6816(95)00053-4.
7. **Zahn, W.** The dependence of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy / W. Zahn, A. Zösch // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry. – 1995. – V. 365. – I. 1-3. – P. 168-172. DOI: 10.1007/s002160051466.
8. **Anofriev, V.A.** Fractal relief on the surface of molybdenum films / V.A. Anofriev, N.Yu. Sdobnyakov, A.S. Antonov et al. // Proceedings of the 2025 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2025 ElCon), January 28 - 29, 2025, St. Petersburg, Russia. – St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2025. – P. 958-963.
9. **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.
10. **Иванов, Д.В.** Получение наноразмерных пленок платины, обладающих фрактальными свойствами / Д.В. Иванов, А.С. Антонов, Е.М. Семенова и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 73-88. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.073.
11. **Ivanov, D.V.** Determination of the fractal size of titanium films at different scales / D.V. Ivanov, A.S. Antonov, E.M. Semenova et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1758. – Art. № 012013. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012013.
12. **Anofriev, V.A.** Patterns of formation of relief of titanium and molybdenum nanofilms: fractal approach / V.A. Anofriev, A.S. Antonov, E.M. Semenova et al. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2025. – V. 19. – I. 6. – P. 1683-1690. DOI: 10.1134/S1027451025702362.
13. **Anofriev, V.A.** Fractal relief on the surface of molybdenum films / V.A. Anofriev, N.Yu. Sdobnyakov, A.S. Antonov et al. // Materials Letters. – 2026. – V. 421. – Art. № 141198. – 5 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2026.141198.
14. **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.
15. **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.
16. **Zahn, W.** Characterization of thin-film surfaces by fractal geometry / W. Zahn, A. Zösch // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry. – 1997. – V. 358. – I. 1-2. – P. 119-121. DOI: 10.1007/s002160050360.
17. **Barabásy, A.L.** Fractal concepts in surface growth / A.L. Barabásy, H.E. Stanley. – Cambridge: Cambridge University Press, 1995. – XX, 366 p.
18. **Persson, B.N.J.** On the fractal dimension of rough surfaces / B.N.J. Persson // Tribology Letters. – 2014. – V. 54. – I. 1. – P. 99-106. DOI: 10.1007/s11249-014-0313-4.
19. **Антонов, А.С.** Комплексный подход к изучению фрактальных структур на поверхности железа / А.С. Антонов, Н.Ю. Сдобняков, В.А. Анофриев и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 7-23. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.007.
20. DigitalSurf. – Режим доступа: www.url: https://www.digitalsurf.com. – 31.07.2026.
21. **Анофриев, В.А.** Сравнительный анализ процесса формирования фрактальных металлических пленок: атомистическое моделирование / В.А. Анофриев, А.С. Антонов, С.А. Васильев и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 339-352. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.339.
22. **Howland, R.** A practical guide to scanning probe microscopy / R. Howland, L. Benatar. – Sunnyvale: Park Scientific Instruments, 1996. – 74 p.
23. **Нгуен, В.Т.А.** Трансформация морфологии тонких пленок никеля и циркония на естественно окисленных кремниевых подложках при отжиге в вакууме / В.Т.А. Нгуен, П.Г. Габдуллин, А.В. Архипов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2025. – Т. 18. – № 4. – С. 139-150. DOI: 10.18721/JPM.18410.
24. **Gromov, D.G.** Fluctuation phenomena in nanoscale nickel films near the melting point / D.G. Gromov, G.P. Zhigal'skii, A.V. Karev et al. // Semiconductors. – 2011. – V. 45. – I. 13. – P. 1689-1693. DOI: 10.1134/S1063782611130136.

25. **Neyts, E.C.** Numerical study of the size-dependent melting mechanisms of nickel nanoclusters / E.C. Neyts, A. Bogaerts // The Journal of Physical Chemistry C. – 2009. – V. 113. – I. 7. – P. 2771-2776. DOI: 10.1021/jp8058992.
26. **Торхов, Н.А.** Определение фрактальной размерности поверхности эпитаксиального n-GaAs в локальном пределе / Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.В. Ивонин, В.А. Новиков // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43. – Вып. 1. – С. 38-47.
27. **Harada, S.** Electrodeposition of fractal structured nickel for hydrogen evolution reaction in alkaline / S. Harada, Y. Hua, S. Nakanishi et al. // ChemElectroChem. – 2024. – V. 11. – I. 9. – Art. no. e202400005. – 7 p. DOI: 10.1002/celc.202400005.
28. **Lewis, A.E.** Using fractal structure to describe nickel crystal morphology / A.E. Lewis, M. Roberts // JOM. – 2003. – V. 55. – I. 2. – P. 59-61. DOI: 10.1007/s11837-003-0229-1.

References:

1. Ivanov G.S., Brylkin Yu.V. Fraktal'naya geometricheskaya model' mikropoverkhnosti [Fractal geometric microsurface model], *Geometriya i grafika [Geometry & Graphics]*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 4-11. DOI: 10.12737/18053. (In Russian).
2. Brylkin Yu.V., Kusov A.L., Florov A.V. Testirovanie algoritma modelirovaniya rel'efa sherokhovatoj poverkhnosti na osnove teorii fraktalov [Testing a rough surface relief modeling algorithm based on fractal theory, *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta], [Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University]*, 2014, vol. IV, no. 5, pp. 86-89. (In Russian).
3. Belko A.V., Nikitin A.V., Strekal' N.D., German A.E. Fractal structure of gold clusters formed under vacuum deposition on dielectric substrates, *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2009, vol. 3, issue 3, pp. 338-342. DOI: 10.1134/S1027451009030021.
4. Van Put A., Vertes A., Wegrzynek D. et al. Quantitative characterization of individual particle surfaces by fractal analysis of scanning electron microscope images, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1994, vol. 350, issue 7-9, pp. 440-447. DOI: 10.1007/BF00321787.
5. Mannelquist A., Almquist N., Fredriksson S. Influence of tip geometry on fractal analysis of atomic force microscopy images, *Applied Physics A*, 1998, vol. 66, supplement issue 1, pp. S891-S895. DOI: 10.1007/s003390051262.
6. Douketis C., Haslett T.L., Wang Z. et al. Rough silver films studied by surface enhanced Raman spectroscopy and low temperature scanning tunnelling microscopy, *Progress in Surface Science*, 1995, vol. 50, issue 1-4, pp. 187-195. DOI: 10.1016/0079-6816(95)00053-4
7. Zahn W., Zösch A. The dependence of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1995, vol. 365, issue 1-3, pp. 168-172. DOI: 10.1007/s002160051466.
8. Anofriev V.A., Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S. et al. Fractal relief on the surface of molybdenum films, *Proceedings of the 2025 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2025 ElCon)*, January 28-29, 2025, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2025, pp. 958-963.
9. Sdobnyakov N.Yu., Zykov T.Yu., Bazulev A.N., Antonov A.S. Opredelenie fraktal'noi razmernosti ostrovkovykh plenok zolota na slyude [Determination of the fractal dimension of island films of gold on mica], *Vestnik TvGU, seriya «Fizika» [Herald of Tver State University, series «Physics»]*, 2009, issue 6, pp. 112-119. (In Russian).
10. Ivanov D.V., Antonov A.S., Semenova E.M. et al. Poluchenie nanorazmernykh plenok platiny, obladayushchikh fraktal'nymi svojstvami [Obtaining nanosized platinum films with fractal properties], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2020, issue 12, pp. 73-88. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.073. (In Russian).
11. Ivanov D.V., Antonov A.S., Semenova E.M. et al. Determination of the fractal size of titanium films at different scales, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1758, art. no. 012013, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012013.
12. Anofriev V.A., Antonov A.S., Semenova E.M. et al. Patterns of formation of relief of titanium and molybdenum nanofilms: fractal approach, *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2025, vol. 19, issue 6, pp. 1683-1690. DOI: 10.1134/S1027451025702362.
13. Anofriev V.A., Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S. et al. Fractal relief on the surface of molybdenum films, *Materials Letters*, 2026, vol. 421, art. no. 141198, 5 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2026.141198.
14. Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S., Ivanov D.V. *Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyj analiz*

metallicheskikh plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric substrates: monography]. Tver: Tver State University Publ., 2019, 168 p. (In Russian).
15. Antonov A.S., Sdobnyakov N.Yu., Ivanov D.V. et al. Issledovanie fraktal'nykh svojstv nanorazmernykh plenok zolota, serebra i medi: atomno-silovaya i tunnel'naya mikroskopiya [Investigation of fractal properties of nanosized gold, silver and copper films: atomic force and tunnelling microscopy], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy]*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 473-486. (In Russian).
16. Zahn W., Zösch A. Characterization of thin-film surfaces by fractal geometry, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1997, vol. 358, issue 1-2, pp. 119-121. DOI: 10.1007/s002160050360.
17. Barabásy A.L., Stanley H.E. *Fractal concepts in surface growth*. Cambridge, Cambridge University Press, 1995, XX, 366 p.
18. Persson B.N.J. On the fractal dimension of rough surfaces, *Tribology Letters*, 2014, vol. 54, issue 1, pp. 99-106. DOI: 10.1007/s11249-014-0313-4.
19. Antonov A.S., Sdobnyakov N.Yu., Anofriev V.A. et al. Kompleksnyj podkhod k izucheniyu fraktalnykh struktur na poverkhnosti zheleza [Comprehensive approach to studying fractal structures on iron surfaces], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 7-23. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.007. (In Russian).
20. DigitalSurf. Available at: www.url: https://www.digitalsurf.com (accessed 31.07.2026).
21. Anofriev V.A., Antonov A.S., Vasilyev S.A. et al. Sravnitelnyj analiz protsessa formirovaniya fraktalnykh metallicheskikh plenok: atomisticheskoe modelirovanie [Comparative analysis of the process of formation of fractal metal films: atomistic simulation], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2025, issue 17, pp. 339-352. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.339. (In Russian).
22. Howland R., Benatar L. *A practical guide to scanning probe microscopy*. Sunnyvale, Park Scientific Instruments, 1996, 74 p.
23. Nguyen V.T.A., Gabdullin P.G., Arkhipov A.V. Transformatsiya morfologii tonkikh plenok nikelya i tsirkoniya na estestvenno okislennykh kremnievykh podlozhkakh pri otzhige v vakuume [Modification of morphology of thin nickel and zirconium films on naturally oxidized silicon substrates by annealing in vacuum], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics]*, 2025, vol. 18, no. 4, pp. 139-150. DOI: 10.18721/JPM.18410.
24. Gromov D.G., Zhigal'skii G.P., Karev A.V. et al. Fluctuation phenomena in nanoscale nickel films near the melting point, *Semiconductors*, 2011, vol. 45, issue 13, pp. 1689-1693. DOI: 10.1134/S1063782611130136.
25. Neyts E.C., Bogaerts A. Numerical study of the size-dependent melting mechanisms of nickel nanoclusters, The Journal of Physical Chemistry C, 2009, vol. 113, issue 7, pp. 2771-2776. DOI: 10.1021/jp8058992.
26. Torkhov N.A., Bozhkov V.G., Ivonin I.V., Novikov V.A. Determination of the fractal dimension for the epitaxial n-GaAs surface in the local limit, *Semiconductors*, 2009, vol. 43, issue 1, pp. 33-41. DOI: 10.1134/S1063782609010084.
27. Harada S., Hua Y., Nakanishi S. et al. Electrodeposition of fractal structured nickel for hydrogen evolution reaction in alkaline, *ChemElectroChem*, 2024, vol. 11, issue 9, art. no. e202400005, 7 p. DOI 10.1002/celc.202400005.
28. Lewis A.E., Roberts M. Using fractal structure to describe nickel crystal morphology, *JOM*, 2003, vol. 55, issue 2, pp. 59-61. DOI: 10.1007/s11837-003-0229-1.