# ПРОБЛЕМЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ ТЕРМОСТОЙКИХ ОРГАНОСИЛИКАТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2025 г. О. А. Шилова<sup>1, \*</sup>, В. Н. Епимахов<sup>2</sup>, Л. Н. Красильникова<sup>1</sup>, А. В. Смешко<sup>1</sup>, В. А. Алексеев<sup>1</sup>, Ю. Е. Горшкова<sup>3</sup>, В. Ю. Долматов<sup>4</sup>, А. Е. Барашков<sup>2</sup>, Т. А. Кочина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова — Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», наб. Макарова, ∂.2, Санкт-Петербург, 199034, Россия

<sup>2</sup> ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», Копорское шоссе, д.72, г. Сосновый Бор, Ленинградская область, 188540, Россия

<sup>3</sup> Объединённый институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, д.б. г. Дубна, Московская область, 141980, Россия

<sup>4</sup> ФГУП «СКТБ «Технолог», тер. Усть-Славянка, Советский пр., д. 33а, Санкт-Петербург, 192076, Россия \*e-mail: olgashilova@bk.ru

Поступила в редакцию 22.08.2025 г. После доработки 11.09.2025г. Принята к публикации 12.09.2025 г.

Анализируются результаты дезактивируемости термостойких и радиационностойких органосиликатных покрытий, предназначенных для защиты оборудования АЭС, в зависимости от их состава и шероховатости поверхности. Апробирована возможность улучшения физико-механических свойств этих покрытий за счет добавки детонационного наноалмаза.

*Ключевые слова:* органосиликатные композиции, кремнийорганический лак, гидросиликаты, шероховатость, атомносиловая микроскопия, коэффициенты дезактивации

## PROBLEMS OF DECONTAMIATION OF HEAT-RESISTANT ORGANOSILICATE COATINGS FOR THE NUCLEAR INDUSTRY

© 2025. O. A. Shilova, V. N. Epimakhov, L. N. Krasil'nikova, A. V. Smeshko, V. A. Alekseev, Yu. E. Gorshkova, V. Yu. Dolmatov, A. E. Barashkov, T. A. Kochina

The results of deactivation of heat-resistant and radiation-resistant organosilicate coatings intended for protection of nuclear power plant equipment depending on their composition and surface roughness are analyzed. The possibility of improving the physical and mechanical properties of these coatings by adding detonation nanodiamond is tested.

*Keywords:* organosilicate compositions, silicone varnish, hydrosilicates, roughness, atomic force microscopy, deactivation coefficients

Кремнийорганический лак KO-921 – KO-921 lacquer Кремнийорганический лак – silicone varnish

## ВВЕДЕНИЕ

Среди «чистых» источников энергии атомная генерация занимает 2-е место в мире, уступая лишь гидроэнергетике [1]. Наблюдается значительный рост мировой выработки ядерной энергии и среднего коэффициента использования установленной мощности [2, 3]. Эти данные свидетельствуют о сохраняющейся высокой эффективности работы мирового парка ядерных реакторов. Доля России в мире по атомной энергетике на АЭС составляет 19%. В России в настоящее время около 20% электроэнергии производится на атомных электростанциях (АЭС), т.е., каждый пятый киловатт-час электроэнергии в стране произведен на атомных станциях, а в европейской части России доля такой генерации – около 40% [2].

При этом общепризнано, что советские разработки обеспечили России большой задел в области мирного атома [2]. Это касается и разработок и в области защитных покрытий для оборудования АЭС. В середине прошлого века в Институте химии силикатов им. И.В. Гребенщикова АН СССР были разработаны органосиликатные композиции, из которых получали термостойкие и радиационностойкие защитные покрытия, пригодные для эксплуатации в зоне первого контура ядерных реакторов АЭС [4, 5]. Наибольшее распространение получила органосиликатная композиция ОС 51-03, которая производится на основе лака КО-921, представляющего собой раствор (фенилсилсесквиоксан)-(диметилсилоксан) сополимера в толуоле, и высокодисперсных наполнителей — силикатов и оксидов тугоплавких металлов. Силикаты являются обязательными компонентами в составе органосиликатных композиций (ОСК). Считается, что в процессе изготовления ОСК, под влиянием механоактивации они вступают в химическое взаимодействие с полиорганосилоксанами, что способствует высокой термостойкости получаемых органосиликатных покрытий (ОСП), значительно превышающей термостойкость, как исходных полиорганосилоксанов, взятых по

отдельности, так и в сочетании с несиликатными наполнителями, например, с оксидами металлов [5-7]. Благодаря слоистому строению силикатов (слюда, асбест) и наличию в них силанольных групп, вкупе с полисилоксанами, после механоактивации и отверждения такие композиции образуют единую пространственно сшитую структуру [4-6]. Сравнительное изучение радиационной стойкости покрытий на различных органополимерных связующих при 40°C при воздействии нейтронов показало, что ОСП на основе ОСК ОС-51-03 выдерживает до начала разрушения интегральную дозу облучения  $5 \times 10^{19}$  нейтр./см<sup>2</sup>, эпоксидная эмаль ЭП-525, пентафталевая эмаль ПФ-837, перхлорвиниловая эмаль XB-124, натуральная олифа выдерживают  $5 \times 10^{18}$ ,  $2 \times 10^{17}$ ,  $10^{16}$ ,  $10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup> соответственно, то есть ниже, чем ОСП [8].

В последние годы Госкорпорация «Росатом» осуществляет масштабную программу сооружения АЭС, как в Российской Федерации, так и за рубежом. В настоящее время в России сооружаются три новых энергоблока. За рубежом строят 39 блоков (включая шесть блоков малой мощности) в 10 странах на разных стадиях реализации, в т.ч., такие АЭС, как: «Аккую» (Турция), Бушер (Иран), «Куданкулам» (Индия), "Пакш-2" (Венгрия), «Руппур» (Бангладеш), «Сюйдапу» и «Тяньвань» (Китай), «Эль Дабаа (Египет) [9]. Необходимость эксплуатация инфраструктуры и оборудования АЭС в экстремальных климатических условиях пустыни или тропиков, привело к появлению новых, более жестких требований к свойствам защитных покрытий. Кроме того, учитывая сложную обстановку в мире, более строго стали испытывать защитные покрытия для АЭС, имитируя условия тяжелых аварий [10]. При этом авторами [11] доказано положительное влияние защитного покрытия ОС 51-03 на увеличение прочности разных типов бетонов в условиях, имитирующих запроектные аварии.

Большой объем работ по строительству новых энергоблоков АЭС приводит к необходимости изыскивать пути к сокращению длительности производственных циклов

изготовления оборудования для АЭС. В частности, это касается защитного термостойкого и радиационностойкого ОСП, получаемого из композиции ОС 51-03. Помимо вышеуказанных термостойкости и радиационной стойкости ОСП, необходимым условием применения АЭС является дезактивируемость. Дезактивация его обеззараживание посредством удаления радиоактивных веществ с заражённой территории, с поверхности зданий, сооружений, техники, одежды и др. Для улучшения дезактивируемости еще в советское время было предложено покрывать сформированное ОСП слоем лака КО 921 для придания поверхности большей гладкости. Однако это существенно удлиняет производственный цикл окраски оборудования. Кроме того, в последнее время появилось много нареканий к качеству лака. В связи с этим в Институте химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (в настоящее время – Филиал «Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова» НИЦ «Курчатовский институт») был разработан новый, модифицированный вариант композиции ОС 51-03 – ОС 51-03М, который не требует использования финишного поверхностного лакового слоя, при этом высокая термостойкость покрытия сохраняется [12]. Результат удалось получить, увеличив количество лака в композиции и уменьшить количество пигмента (тугоплавких оксидов), выбрав единственно правильное массовое соотношение компонентов, когда полимерное связующее лак КО-921 по отношению к гидросиликату не должно превышать 2.24 к 1. Это техническое решение было запатентовано. Однако проведенные исследования дезактивируемости этого покрытия показало, что этот показатель необходимо улучшать [13]. Дальнейшие исследования позволили добиться существенного улучшения дезактивируемости за счет оптимизации состава гидросиликатов, получив инновационную композицию ОС-51-03М2 [13]. Однако при этом оказалось, что физико-механические свойства покрытий ухудшились. При этом

до сих пор не до конца понятно, что оказывает доминирующее влияние на дезактивируемость – гладкость поверхности или состав покрытия.

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ состояния поверхности покрытий и их дезактивируемости, полученных из классической органосиликатной композиции ОС-51-03, в т.ч. с финишным слоем лака КО 921, и из модифицированных ОС 51-03М и ОС 51-02М2, с прогнозом о влиянии шероховатости на дезактивируемость поверхности, а также проверка гипотезы о влиянии структурирующей добавки — детонационного наноалмаза, на улучшение физико-механических свойств ОСП, полученных из композиции ОС 51-02М2, обладающих хорошей дезактивируемостью без финишного слоя лака.

## ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез органосиликатных композиций

Для приготовления ОСК были использованы следующие реактивы:

- Связующее: кремнийорганический лак KO-921 (OOO «Дельтапласт»);
- Наполнители: хризотиловый асбест (ООО «Асбестпромснаб»), слюда-мусковит  $K_2O\cdot 3Al_2O_3\cdot 6SiO_2\cdot H_2O$  (дисперсность <160 мкм, АО «ЛенРеактив»), слюда-флогопит  $KMg_3[AlSi_3O_{10}]\cdot (F,OH)_2$  СМФ 160 (АО «Слюдяная фабрика»), тальк М-15 (ООО «Эпсилон»);
  - Пигмент: оксид хрома (III) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> квалификации ЧДА (AO «ЛенРеактив»);
  - Органический растворитель: толуол квалификации х.ч., 99.94% (AO «Вектон»);
  - Отвердитель: продукт АГМ-9 «(ООО «Тантал-ЛК).
- Модификаторы (структурирующие агенты) алмаз детонационного синтеза
   (ДНА), производство ФГУП «СКТБ «Технолог», марки ДНА 6.5, полученный из смеси

тротила с гексогеном (50/50), подвергнутый нагреву в автоклаве при ограниченном доступе воздуха при 650°С в течение двух часов. Выход составляет 92 масс. % от массы загруженного в автоклав исходного ДНА. ДНА-6,5 частично дезагрегирован и образует достаточно устойчивую суспензию в воде и органических растворителях.

Синтез ОСК осуществляли в лабораторных условиях. В шаровую фарфоровую мельницу объемом 0.5 л загружали фарфоровые шары объемом 0.15–0.2 л, наполнители и пигмент, лак и органический растворитель в количестве достаточном для нанесения полученной суспензии предполагаемым методом. После гомогенизации и механоактивации в течение 48 часов в шаровой мельнице, полученные ОСК выгружали. Перед нанесением в ОСК вводили отвердитель АГМ-9 в количестве 2 масс. % по отношению к массе каждой из композиций. Составы ОСК приведены в Таблице 1.

Таблица 1: Состав исследованных органосиликатных композиций

Компонент, масс. %	Марки ОСК				
	51-03	51-03_лак*	51-03M	51-03M2	51-03М2-ДНА
Лак кремнийорганический					
КО 921, в расчете на сухое	55	55	67	67	67
вещество					
Хризотиловый асбест	15	15	16		_
Слюда-мусковит	15	15	14	14	14
Тальк	_	_	_	16	16
Оксид хрома (III) Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	5	3	3	2
Оксид титана – рутил ТіО2	10	10	_	_	_
Детонационный наноалмаз, ДНА-6.5	_	_	_	_	1

<sup>\*/</sup>Покрытие ОС 51-03 с финишным слоем лака КО 921 на поверхности.

## Формирование покрытий

Нанесение ОСК на подложки осуществляли пневматическим распылением или наливом. Для исследования адгезии использовались пластины из стали (марка пс-08,

размер  $150 \times 70 \times 2$  мм) и стекла (размер  $70 \times 200 \times 1.8$  мм), а для определения прочности на удар — пластины из алюминия (размер  $100 \times 100 \times 2$  мм). Исследовались покрытия холодного отверждения, термообработка не проводилась.

## Исследование физико-механических свойств покрытий

Адгезия измерялась по методу решетчатого надреза (ГОСТ 31149-2013). Прочность на удар определяли на приборе У-1, ГОСТ 4765, масса шарика 1 г, диаметр 8 мм. Твердость покрытий (ГОСТ 5233) определялась по показаниям твердомера ТМЛ–2124 с маятником Персоза. Для определения твердости органосиликатные композиции наносили на стеклянные пластинки.

## Исследование состояния поверхности покрытий

Исследование морфологии поверхности ОСП проводилось методом атомносиловой микроскопии (АСМ) в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Московская область, Россия). Изображения топологии поверхности покрытий были получены на сканирующем зондовом микроскопе NTEGRA (NT-MDT Spectrum Instruments, Зеленоград, Россия) в полуконтактном режиме со скоростью сканирования 0.3–0.6 Гц. Так, для сканов, представленных на Рис. 1а–1г и Рис. 2в, размером 3 × 3 мкм (512 × 512 пикселей) скорость съемки составляла 1.8 мкм/с. Для исследования поверхности использовалась игла NGS 30 (NT-MDT Spectrum Instruments, Зеленоград, Россия). Обработка изображений и определение шероховатости поверхностей выполнены с помощью программного обеспечения NT-MDT Spectrum Instruments Image Analysis P9.»

## Методика исследования дезактивируемости покрытий

Испытанию подвергались ОСП, нанесенные на стальные диски диаметром 29 мм и толщиной Исследования ΦГУП 3 mm. проводились В организации «НИТИ им. А.П. Александрова». Испытания образцов осуществляли в соответствии требованиями, изложенными в ГОСТ Р 53371-2009 «Материалы и покрытия полимерные защитные дезактивируемые. Методы определения коэффициента дезактивации».

Проведение измерений и обработку результатов выполняли в соответствии с требованиями, изложенными в ГОСТ 25146-82 «Материалы радиохимических производств и атомных энергетических установок. Метод определения коэффициента дезактивации».

Условия проведения испытаний:

Температура воздуха:  $23 \pm 5$ °C, влажность воздуха не более 50% при 25°C.

Наименование сертифицированных средств измерения:

- Радиометр РКС-02С1 зав. № 040А (метрологические характеристики не хуже характеристик, указанных в пунктах 2.1.1, 2.1.2 ГОСТ 26412-85).
- Эталонный источник бета-излучения марка 0877.4CO-213.18, аттестованная активность радионуклидов  $^{90}$ Sr+ $^{90}$ Y, на 22.06.2022 г. 1890 Бк, рассчитанная активность на 20.10.2023 г. 1831,17 Бк.
- Прибор комбинированный для измерения условий окружающей среды Testo 622,
   зав.№39524564/0720.
  - Весы лабораторные ВЛ-210, зав. номер А170.

Порядок проведения испытаний на дезактивируемость:

В качестве исходного радиоактивного раствора  $^{137}$ Cs использовали солянокислый раствор хлорида цезия (паспорт №71-097-20(1); в качестве радиоактивного раствора  $^{152}$ Eu (14.8%  $^{154}$ Eu) использовали солянокислый раствор хлорида европия (паспорт-сертификат №5626). Объёмная активность раствора  $^{137}$ Cs составляла (2.0 ± 0.2)·10 $^7$  Бк/дм $^3$ , pH = 5.8. Объёмная активность раствора  $^{152}$ Eu составила (2.1±0.2)·10 $^4$  Бк/дм $^3$ , pH = 5.3.

В центр каждого образца наносили микропипеткой 0.15 мл загрязняющего радиоактивного раствора в виде одной капли. Затем образцы сушили при температуре 23°C в течение 18-20 часов с последующим измерением уровня начального радиоактивного загрязнения в соответствии с ГОСТ Р 53371-2009 «Материалы и покрытия полимерные защитные дезактивируемые. Методы определения коэффициента дезактивации». Далее образцы вставляли в держатель из фторопласта-4, который помещали в стеклянный стакан, заполненный 240 мл дезактивирующей водной рецептуры. В качестве дезактивирующей рецептуры использовали препарат дезактивирующий СФ-3К. Дезактивирующая рецептура содержала 0.5% (по массе) препарата СФ-3 (0.15% сульфонола, 0.35% полифосфата натрия) и 0.5% (по массе) щавелевой кислоты. Дезактивацию образцов проводили путем перемешивания раствора с помощью магнитной мешалки в следующем порядке: обработка дезактивирующей водной рецептурой – 10 минут, обработка дистиллированной водой – 5 минут. Образцы после дезактивации просушивали фильтровальной бумагой и выдерживали при комнатной температуре в течение 1 часа. Измерение уровня остаточного радиоактивного загрязнения проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 25146-82, одновременно фиксируя фоновый уровень загрязнения, регистрируемый радиометрической установкой. Цикл загрязнения-дезактивации повторяли три раза в соответствии с п.6.9 ГОСТ Р 53371-2009. Коэффициенты дезактивации  $K_{д1}$ ,  $K_{д2}$ ,  $K_{д3}$  рассчитывали по отношению к изотопам <sup>137</sup>Cs и <sup>152</sup>Eu по 3 образцам на радионуклид.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние состава и шероховатости поверхности покрытий на дезактивацию поверхности

ОСП, получаемые из композиции ОС 51-03 с финишным слоем лака отвечают требованиям по дезактивируемости, предъявляемым к покрытиям, находящимся в зоне первого контура ядерного реактора АЭС. Коэффициент дезактивации после трех обработок для изотопа цезия-137 должен быть более 60 (ГОСТ 51102-97). Как уже указывалось выше, модификация состава композиции, а именно: изменение соотношения связующего (кремнийорганического лака) и высокодисперсных пигментов (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>), – позволило отказаться от финишного слоя лака. В то же время за счет наличия силикатов сохранилась необходимая высокая термостойкость ОСП (300–350°С) [12, 13], но не был достигнут необходимый уровень дезактивации покрытий [13]. Дальнейшие изменение в составе наполнителей (гидросиликатов), прежде всего, отказ от использования асбеста, позволил добиться высокой дезактивируемости ОСП (Табл. 2).

Таблица 2. Результаты определения коэффициентов дезактивации ( $K_{д1}$ ,  $K_{д2}$ ,  $K_{д3}$ ) <sup>137</sup>Cs и <sup>152</sup>Eu для органосиликатных покрытий, полученных из модифицированных органосиликатных композиций

Наименование покрытия	Коэффициенты дезактивации <sup>137</sup> Cs		
	$K_{A1}$	$K_{ extsf{ iny 2}}$	$K_{{ t  ilde { t  ext{ iny }}}3}$
OC 51-03M	$188 \pm 22$	80 ± 4	38 ± 2
OC 51-03M2	$1282 \pm 107$	$121 \pm 26$	73 ± 5
Наименование покрытия	Коэффициенты дезактивации <sup>152</sup> Eu		
	$K_{A1}$	$K_{\rm д2}$	$K_{ m д3}$
OC 51-03M	11 ± 2	10 ± 3	9 ± 2
OC 51-03M2	$1700 \pm 906$	$389 \pm 85$	$243 \pm 22$

Как видно из Табл. 2, на протяжении всех трех циклов загрязнения-дезактивации значения коэффициентов дезактивации для покрытия ОС 51-03М2 (без хризотилового асбеста) существенно выше, чем для покрытий с асбестом ОС 51-03М.

Фиксация радионуклидов на поверхности и в объеме покрытия может протекать по образования двойного электрического нескольким механизмам: адгезии, хемосорбции, диффузии в капиллярах, ионного обмена и другим. С практической точки зрения все эти механизмы можно разделить на два вида: сорбция на активных центрах и фиксация за счет проникновения в поры покрытия. Десорбция протекает по обратному механизму по механизму рефиксации с активных центров или редиффузии. Поэтому и для дезактивации необходимо подбирать или химически реакционные растворы, а для редиффузии – кроме того и время контакта с дезраствором. Существенный вклад оказывают наполнители и физико-химическое состояние радионуклида в загрязняющем образом, эффективная дезактивация полимерных растворе. Таким материалов определяется специфическими свойствами этих материалов и загрязняющих растворов, что и подтверждается данными по дезактивации после загрязнения.

В нашем исследовании оставалось невыясненным, что же оказывает доминирующее влияние на дезактивируемость покрытий – гладкость поверхности или слоистая структура наполнителя, прежде всего асбеста, который, видимо хорошо поглощает и удерживает радионуклиды. Для ответа на этот вопрос с использованием метода АСМ было проведено исследование морфологии поверхности ОСП и оценена шероховатость их поверхности. Впервые было осуществлено сравнение этого показателя для классического варианта ОСП, в т.ч. с финишным слоем лака, применяемых на АЭС в настоящее время, с показателями шероховатости для инновационных ОСП, полученных из двух модифицированных ОСК (Рис. 1).

**Рис. 1.** АСМ-изображения поверхности органосиликатных покрытий, полученных из немодифицированных и модифицированных органосиликатных композиций (маркировки и составы приведены в Табл. 1): а — ОС 51-03; б — ОС-51-03-лак; в — ОС 51-03М; г — ОС-51-03М2.

В Таблице 3 обобщены данные по дезактивируемости для всех указанных покрытий в сравнении с параметрами, характеризующими шероховатость их поверхности. В инновационном покрытии ОС 51-03 М2 асбест заменен на тальк. Тальк, как известно [14], единственный функциональный наполнитель, который одновременно положительно влияет на технологические, эксплуатационные, физико-механические и декоративные свойства лакокрасочных покрытий. Химическая инертность талька позволяет применять его в рецептурах антикоррозионных материалов. Он обладает низкой пористостью, что способствует повышению защитных свойств покрытия за счет уменьшения диффузии агрессивных веществ [15].

Таблица 3. Сравнительная таблица параметров немодифицированных и модифицированных органосиликатных покрытий (маркировки и составы приведены в табл. 1)

Параметры	Наименование покрытий			
	OC 51-03	ОС 51-03_лак	OC 51-03M	OC 51-03M2
Шероховатость				
– Средняя				
арифметическая, Sa, нм	2.92	1.66	0.47	0.49
_				
Среднеквадратическая,				
<i>S</i> q, нм	4.45	2.64	0.63	0.65

Коэффициенты			38±2	73±5
дезактивации $^{137}$ Cs, $K_{д3}$				
Коэффициенты	<60	>60	9±2	243±22
дезактивации $^{152}$ Eu, $K_{д3}$				

*Примечание:*  $K_{д3}$  — коэффициент дезактивации для третьего, заключительного цикла загрязнения-дезактивации.

Как видно из Таблицы 3, поверхность классического варианта покрытия (ОС 51-03) существенно более шероховатая, чем поверхность того же покрытия с финишным слоем лака. Использование модифицированной композиции с увеличенным содержанием связующего (кремнийорганического лака), несмотря на сохранение в составе ОСП хризотилового асбеста, отличается высокой гладкостью. Тем не менее, способность к дезактивации у этого покрытия оказалась недостаточной для использования на АЭС в зоне первого контура ядерного реактора. Замена асбеста на тальк в модифицированном покрытии ОС 51-03М, позволила существенно повысить коэффициенты дезактивации по отношению к радионуклидам <sup>137</sup>Сѕ и, особенно, к радионуклидам <sup>152</sup>Еu. При этом шероховатость покрытия ОС 51-03М2 осталась на прежнем уровне. Таким образом, гладкость поверхности не является единственной характеристикой, от которой зависит дезактивируемость покрытий. Более того, внутренняя структура ОСП, наличие наполнителей, хорошо поглощающих и удерживающих радионуклиды, оказывает более существенное влияние.

Исследования, направленные на улучшение физико-механических свойств покрытий

Органосиликатные покрытия для АЭС должны иметь хорошую адгезию к защищаемой поверхности (металлу, бетону), обладать достаточной прочностью на удар и твердостью. К сожалению, удаление такого наполнителя как хризотиловый асбест и

уменьшение содержания пигмента отрицательно сказалось на физико-механических свойствах покрытий из модифицированных ОСК. Одним из путей улучшения физикомеханических свойств покрытий, получаемых из лакокрасочных и золь-гель композиций, является введение в них специальных добавок. В последнее время в качестве структурирующих добавок в лаки и лакокрасочные композиции стали вводить наночастицы углеродных материалов, оксидов кремния и металлов [16-20]. Так, авторы [19-21] отмечают, что введение наноматериалов в лакокрасочные покрытия повышает адгезионно-когезионное взаимодействие и оказывает положительное воздействие на эксплуатационные характеристики покрытий строительных металлоконструкций (механическая прочность, огнестойкость, антистатичность, тепловая защита, химическая стойкость, диэлектрические характеристики). Например [21], усиливающий эффект от совместного введения углеродных нанотрубок (0.1%) и наночастиц оксида висмута (1%) возникает за счет изменения структуры покрытия с глобулярной в фибриллярную и уменьшения величины выступов в покрытии, по параметру средней шероховатости (Ra), с 50-60 нм до 10-15 нм. Нечто подобное нами было обнаружено для покрытия, полученного из кремнезоля на основе гидролизованного тетраэтоксисилана и эпоксидной диановой смолы [22]. Небольшие добавки детонационного наноалмаза (0.20–0.25 масс. % ДНА) изменили структуру эпоксидно-силоксанового покрытия, для которого характерно микрофазовое расслоение. Эпоксидная и кремнеземная взаимопроникающие области, имеющие округлую форму, под влиянием ДНА вытянулись, что упрочнило структуру покрытия. Результаты натурных испытаний этих покрытий в течение нескольких месяцев на российской антарктической станции Беллинсгаузен, где ежедневно температура воздуха переходила через ноль градусов Цельсия, показали, что количество дефектов по межфазным границам существенно уменьшилось.

Опираясь на свой опыт и литературные данные, для улучшения физикомеханических свойств в модифицированную ОСК ОС 51-03М2 был введен ДНА в количестве 0.1 и 1.0 масс. %. Выбор ДНА связан с особенностями его структуры – наличие алмазного ядра и обилие функциональных групп на поверхности [23]. Последнее является предпосылкой химического взаимодействия с гидроксильными группами кремнийорганического лака. Важно также то, что из всего многообразия углеродных наноматериалов в настоящее время только ДНА и углеродные нанотрубки производят в промышленных масштабах (тонны в год) [24]. Кроме того, ДНА экологически безопасен и обладает бактерицидными свойствами [23–25].

Первые эксперименты показали, что введение ДНА в модифицированную ОСК, действительно, способствует улучшению физико-механических свойств ОСП, особенно адгезии и прочности на удар (Табл. 4). Более того, если использовать ультразвуковое воздействие при введении ДНА в ОСК, состояние поверхности ОСП (улучшение адгезии, отсутствие дефектов) улучшается. Это наше наблюдение совпадает с данными авторов [26], которые отметили уплотнение структуры и улучшение физико-механических свойств покрытий, получаемые из кремнийорганических композиций с наполнителями – омиакарбом (тонкоизмельчённый порошок карбоната кальция, полученный из белого мрамора высокой чистоты) и угольной пылью.

Таблица 4. Физико-механические свойства органосиликатных покрытий холодного отверждения, полученных из композиции ОС 51-03М без добавок и с добавками ДНА

Параметры	Наименование покрытий			
•	OC 51-03M2	ОС 51-03М2-ДНА		
		Концентрация ДНА в масс. %		
		по отношению к сухому остатку		
		0.1	1.0	
Адгезия, балл.	3–4	1	1	

Прочность на удар, см	<20	20	>20
Твердость, отн. ед.	$0.36 \pm 0.2$	$0.31 \pm 0.1$	$0.31 \pm 0.1$

Примечание: Значения твердости даны для покрытий холодного отверждения через 1 неделю после нанесения; по мере выдержки покрытий на воздухе — через 4 недели и более, твердость покрытий возрастает до ~0.5 отн. ед.

По сравнению с адгезией и прочностью на удар твердость ОСП, содержащих ДНА, не увеличивается, а, наоборот, уменьшается. Это вполне логично, поскольку увеличивается прочность на удар, т.е. покрытие за счет изменения структуры становится более эластичным. По мере старения покрытий эта тенденция сохраняется.

Для проверки шероховатости покрытия, полученного из модифицированной ОСК, содержащей ДНА (1 масс. %, см. Табл. 1), использовали метод АСМ (Рис. 2., Табл. 5).

Рис. 2. АСМ-изображения поверхности органосиликатных покрытий, полученных из модифицированной органосиликатной композиций ОС 51-03М2-ДНА, содержащей 1 масс. % ДНА, при меньшем (а) и большем увеличении (б). В квадрате выделено поле без крупных включений ДНА.

Таблица 5. Параметры шероховатости покрытия, полученных из композиции ОС 51-03M2, содержащего 1 масс. % ДНА

Шероховатость: Размеры участка на АС	
изображениях (Рис. 2)	
14 × 14 HM	1.5 × 1.5 нм*
0.47	0.26
1.17	0.32
	изображ 14 × 14 нм 0.47

<sup>\*/</sup>Данные приведены для участка поверхности, ограниченного квадратом.

Как известно [27, 28], параметр Sa – средняя арифметическая шероховатость (average roughness, ISO 4287/1), определяет шероховатость поверхности в виде двумерного среднего арифметического значения, а параметр Sq – средняя квадратическая шероховатость (root mean square roughness, ISO 4287/1), является определяющей характеристикой шероховатости. Как видно из данных Табл. 5, шероховатость разных участков покрытия ОС 51-03M2-ДНА может изменяться для Sa в пределах  $\sim$ 0.3-0.5 нм, а для Sq в пределах ~0.3-1.2 нм. При более высоком увеличении на поверхности покрытия хорошо видны отдельные агрегаты наночастиц ДНА (Рис. 26). Это приводит к увеличению шероховатости покрытия, судя по изменению величины Sq. В то же время величина Sa, наоборот уменьшилась. Эти явления, по-видимому, являются следствием, с одной стороны, уплотнения структуры покрытия за счет влияния структурирующей добавки ДНА, а, с другой стороны, могут быть связаны с агрегацией и недостаточно равномерным распределением наночастиц ДНА в объеме покрытия. В то же время значения Sa и Sq в разы меньше, чем для классического покрытия ОС 51-03, в т.ч. с финишным слоем лака ОС 51-03-лак. А на участке без крупных включений (Рис. 26, область, выделенная квадратом) шероховатость даже меньше, чем для покрытия аналогичного состава, не содержащего ДНА (Табл. 3 и 5).

Таким образом показано, что введение ДНА в органосиликатные композиции является перспективным направлением для улучшения структуры и физико-механических свойств получаемых покрытий. Однако, методика введения ДНА в органосиликатную композицию требует доработки. В качестве одного из возможных решений для повышения однородности структуры и гладкости поверхности органосиликатных покрытий, модифицированных ДНА, может быть применение ультразвукового озвучивания (на стадии подготовки композиций к нанесению) для предотвращения агрегации наночастиц ДНА.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы показатели дезактивируемости (по отношению к радионуклидам <sup>137</sup>Cs и <sup>152</sup>Eu) и шероховатости термостойкого и радиационностойкого покрытия ОС 51-03, широко применяемого на АЭС для защиты оборудования первого контура реактора, в т.ч. с финишным слоем лака КО 921, в сравнении с инновационными покрытиями ОС 51-03М и ОС-51-03М2. Рецептура последних оптимизирована таким образом, что позволила отказаться от финишного слоя лака, призванного улучшить дезактивируемость покрытий.

Показано, что доминирующее влияние на дезактивируемость покрытий имеет выбор наполнителя – гидросиликата. Замена асбеста на тальк в составе органосиликатной композиции обеспечила достижение необходимого уровня дезактивируемости покрытия.

Введение в органосиликатную композицию нанодисперсного модификатора – детонационного наноалмаза (ДНА), в количестве 0.1 и 1 масс. % (по отношению к сухому остатку) улучшило адгезию и прочность на удар получаемых покрытий. При введении в композицию 1 масс. % ДНА шероховатость покрытия незначительно увеличилась по показателю – Sq (среднеквадратическая шероховатость), а по показателю Sa (средняя шероховатость) – уменьшилась, что предположительно связано с агрегацией ДНА и может быть устранено в дальнейшем. В перспективе ДНА можно рассматривать в качестве функциональной добавки в органосиликатные композиции.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ - ИХС.

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. New report reveals nuclear power generation hits new highs. www.carboncredits.com. August 23, 2024.

URL: https://carboncredits.com/new-report-reveals-surge-in-global-nuclear-reactoroutput-and-efficiency-power-generationwer. (Дата обращения 06.08.2025)

2. *Мишустин:* пятая часть энергии в России производится на АЭС. Сайт tass.ru. 28 апреля 2025 г.

https://tass.ru/ekonomika/23802003?ysclid=me3awewmid182765862 (Дата обращения 08.08.2025)

Кайгородцев А.А. Проблемы и перспективы развития атомной энергетики в глобализированном мире // Научное обозрение. Экономические науки. 2021. № 1. С. 20–24.

https://science-economy.ru/ru/article/view?id=1068 (Дата обращения: 18.08.2025)

- 4. Харитонов Н.П., Кротиков В.А., Худобин Ю.И. Буслаев Г.С., Степанов К.Н. Органосиликатные материалы, их свойства и технология применения. Л.: Наука. 1979. 200 с.
- 5. Кочина Т.А., Буслаев Г.С., Кондратенко Ю.А. Органосиликатные покрытия. От истории создания до инноваций // Физика и химия стекла. 2020. Т. 46. № 1. С. 27–43. https://doi.org/10.31857/S0132665120010114 [Kochina T.A., Buslaev G.S., Kondratenko Y.A. Organocilicate coatings. From creation to innovations // Glass Phys. Chem. 2020. V. 46. № 1. Р. 13–25.

## https://doi.org/10.1134/S1087659620010113]

6. Hulai O.I., Tselyukh O.I., Nironovych I.O, Serednyts'kyi Ya.A. Effect of mineral fillers on the properties of silicone coatings // Materials Science. 1996. V. 32. P. 588–591.

https://doi.org/10.1007/BF02539071

7. Pakhomova V., Povalchuk S. Study of the fillers influence on the organosilicon polymers resistance to high temperatures // Technology Audit and Production Reserves. 2022. V. 4. № 3. P. 6–11.

http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.264632

- Павлова Ф.С., Лукашова Т.А. Покрытия для защиты от коррозии конструкций энергетических реакторов // Лакокрасочные материалы и их применение.
   1980. № 2. С. 24–25.
  - 9. Строящиеся АЭС.

www.rosatom.ru/production/design/stroyashchiesya-aes/?ysclid=mdzwxrtqeo773476841 (Дата обращения 08.08.2025)

- 10. Фиськов А.А., Крицкий В.Г., Макасеев А.Ю., Макасеев Ю.Н., Погребенков В.М. Обоснование применения покрытия контайнмента на основе органосиликатной композиции ОС-51-03 в условиях тяжелых аварий на АЭС // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 2019. № 4 (100). С. 119–127 [Fiskov A.A., Kritsky V.G., Makaseyev A.Yu., Makaseyev Yu.N., Pogrebenkov V.M. Study of behavior of containment coating based on organic silicate compound os.51-03 in severe accidents AT NPP // Journal "Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors" in Russian].
- 11. Фиськов А.А., Крицкий В.Г., Магола И.А., Дитц А.А., Верещагин В.И. Влияние термического воздействия и органосиликатного покрытия на свойства специализированного бетона при сооружении АЭС // Атомная энергия. 2022. Т. 133. № 3. С. 134–139 [Fiskov A.A., Kritskiy V.G., Magola I.A., Ditz A.A., Vereshchagin V.I. Effects of the thermal exposure and organosilicate coating on the properties of a specialized concrete for NPP construction // At Energy. 2023. V. 133. № 3. P. 142–147.

https://doi.org/10.1007/s10512-023-00986-5]

12. Буслаев Г.С., Кочина Т.А., Красильникова Л.Н., Милютина П.А., Шилова О.А. Теплостойкие защитные органосиликатные покрытия для атомной энергетики // T. Физика химия стекла. 2020. 46. No 4. C. 444–448. https://doi.org/10.31857/S0132665120040046 [Buslaev G.S., Kochina T.A., Krasilnikova L.N., Milyutina P.A., Shilova O.A. Heat-resistant protective organosilicate coatings for nuclear energy // Glass Physics and Chemistry. 2020. V. 46. № 4. P. 357–359.

https://doi.org/10.1134/S1087659620040045]

13. Красильникова Л.Н., Смешко А.В., Кочина Т.А., Епимахов В.Н., Шилова О.А. Инновационные органосиликатные покрытия для атомной энергетики // Физика и химия стекла. 2024. Т. 50. № 6. С. 584–588. https://doi.org/10.31857/S0132665124060094 [Krasil'nikova L.N., Smeshko A.V., Kochina T.A., Epimakhov V.N., Shilova O.A. Innovative organosilicate coatings for nuclear energy // Glass Physics and Chemistry. 2024. V. 50. № 6. Р. 719–722.

## https://doi.org/10.1134/S1087659624600601]

14. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. №4. С. 41–48. https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48 [Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Marchenko S.A. Ways to improve the properties of paint coatings by adding different fillers (review) // Scientific and Technical Journal «Aviation Materials and Technologies». 2019. № 4. P. 41–48.

https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48]

15. *Герасимова Л.Г., Скороходова О.Н.* Наполнители для лакокрасочной промышленности. М.: ЛКМ-пресс, 2010. 224 с.

16. *Ma P. C., Siddiqui N. A., Marom G., Kim J. K.* Dispersion and functionalization of carbon nano tubes for polymer-based nanocomposites: a review // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. V. 41. № 10. P. 1345–1367.

https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.07.003

- 17. Глоба А.И., Прокопчук Н.Р., Лаптик И.О., Санкович Н.Л., Духович Ю.В. Модификация двухкомпонентных лакокрасочных материалов углеродными наноматериалами // Труды БГТУ. 2020. Серия 2. № 2. С. 92–99 [Hloba A.I., Prokopchuk N.R., Laptik I.O., Sankovich N.L., Duhovich Yu.V. Modification of two-component paint materials with carbon nanomaterials // Proceedings of BSTU. 2020. Ser. 2. № 2. Р. 92–99 in Russian].
- 18. *Михайлов М.М., Нещименко В.В., Григоревский А.В., Бахтаулова А.С., Ващенков И.С.* Фотостойкость кремнийорганического лака, модифицированного наночастицами // Известия вузов. Физика. 2018. Т. 61. № 8 (728). С. 146–151. [*Mikhailov M.M., Neshchimenko V.V., Grigorevskii A.V., Bakhtaulova A.S., Vashchenkov I.S.* Radiation resistance of nanomodified organosilicic enamel // Russian Physics Journal. 2018. V. 61. № 8. P. 1529–1535.

## https://doi.org/10.1007/s11182-018-1566-4

19. *Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P.* Chemically resistant nanostructured protective coatings for metal surfaces // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2025. V. 10. № 2. 117–128.

https://doi.org/10.17277/jamt-2025-10-02-117-128

20. *Пчельников А.В., Пичугин А.П.* Формирование физико-химической структуры лакокрасочных покрытий при их наномодификации // Строительные материалы. 2023. № 8. С. 63–72. https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-63-71 [*Pchelnikov A.V., Pichugin A.P.* Formation of the physical and chemical structure of paint and

varnish coatings during their nano-modification // Stroitel'nye Materialy/Construction Materials. 2023. № 8. P. 63–71.

## https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-816-8-63-71 - in Russian].

- 21. Пчельников А.В. Наномодифицированные лакокрасочные материалы для защиты строительных металлических конструкций. Автореферат диссертации докт. техн. наук. 2024. Белгород [*Pchelnikov A.V.* Nanomodified paints and varnishes for the protection of building metal structures. Abstract Doctoral. (Engin.) Dissertation. 2024. Belgorod].
- 22. Shilova O.A. Synthesis and structure features of composite silicate and hybrid TEOS-derived thin films doped by inorganic and organic additives // Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2013. V. 68. P. 387–410.

## https://doi.org/10.1007/s10971-013-3026-5

23. Долматов В.Ю., Озерин А.Н., Кулакова И.И., Бочечка А.А., Лапчук Н.М., Мюллюмаки В., Веханен А. Новые аспекты в теории и практике детонационного синтеза, свойствах и применении наноалмазов // Успехи химии. 2020. Т. 89. № 12. С. 1428–1462 [Dolmatov V.Y., Ozerin A.N., Kulakova I.I., Bochechka O.O., Lapchuk N.M., MyllymakI V., Vehanen A. Detonation nanodiamonds: new aspects in the theory and practice of synthesis, properties and applications // Russian Chemical Reviews. 2020. V. 89. № 12. P. 1428–1462.

## https://doi.org/10.1070/RCR4924]

24. Бердичевский Г.М., Васина Л.В., Рюмина Е.В., Шаройко В.В., Семенов К.Н. Перспективы использования наноалмазов в медицине (обзор) // Вопросы биологической, медишинской фармацевтической химии. 2021. T. 24.  $N_{\underline{0}}$ 1. C. 31-37.И https://doi.org/10.29296/25877313-2021-01-05 [Berdichevskiy G.M., Vasina L.V., Ryumina E.V., Sharoyko V.V., Semenov K.N. Prospects for applications of nanodiamonds in medicine (review). Enhance functional activity of antigen-presenting cells //Problems of biological, medical and pharmaceutical chemistry. 2021. V. 24. № 1. P. 31–37.

https://doi.org/10.29296/25877313-2021-01-05]

25. Shenderova O.A., McGuire G.E. Science and engineering of nanodiamond particle surfaces for biological applications (Review) // Biointerphases. 2015. V. 10. № 3. P. 030802.

https://doi.org/10.1116/1.4927679

26. *Marukha M.V., Gnyp I.P.* Anticorrosive temperature-resistant organosilicon coatings with compacted mineral fillers // Materials Science. 2004. V. 40. P. 89–93.

https://doi.org/10.1023/B:MASC.0000042790.69566.81

- 27. Арутнонов П.А., Толстихина А.Л. Сканирующая зондовая микроскопия (туннельная и силовая) в задачах метрологии наноэлектроники // Микроэлектроника. 1997. Т. 26. № 6. С. 426–439.
- 28. Толстихина А.Л. Атомно-силовая микроскопия кристаллов и пленок со сложной морфологией поверхности. Диссертация доктора физ.-мат. Наук. Москва. 2013. 333 с. [Tolstikhina A.L., Doctoral. (Phys.-Mathem.) Dissertation, Moscow, Shubnikov Institute of Crystallography RAS, 2013].

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ к статье – Шилова

- **Рис. 1.** АСМ-изображения поверхности органосиликатных покрытий, полученных из немодифицированных и модифицированных органосиликатных композиций (маркировки и составы приведены в Табл. 1): а ОС 51-03; б ОС-51-03-лак; в ОС 51-03М; г ОС-51-03М2.
- **Рис. 2**. АСМ-изображения поверхности органосиликатных покрытий, полученных из модифицированной органосиликатной композиций ОС 51-03М2-ДНА, содержащей 1 масс. % ДНА, при меньшем (а) и большем увеличении (б). В квадрате выделено поле без крупных включений ДНА.

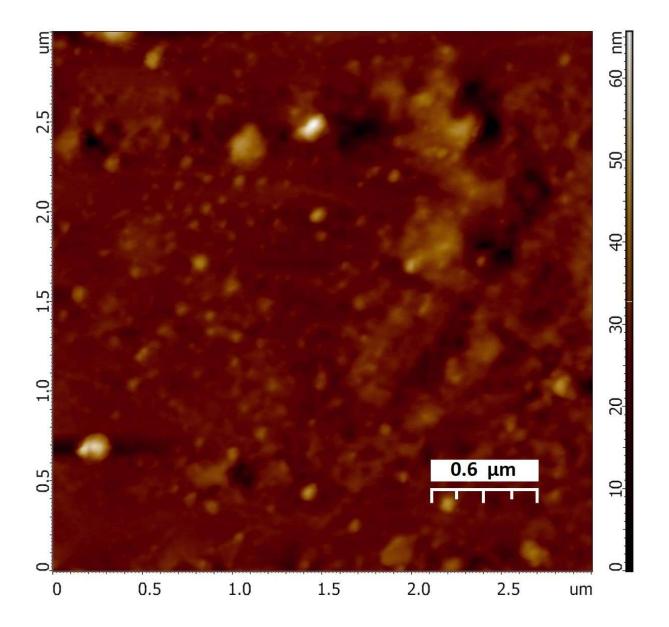


Рисунок 1а – Шилова

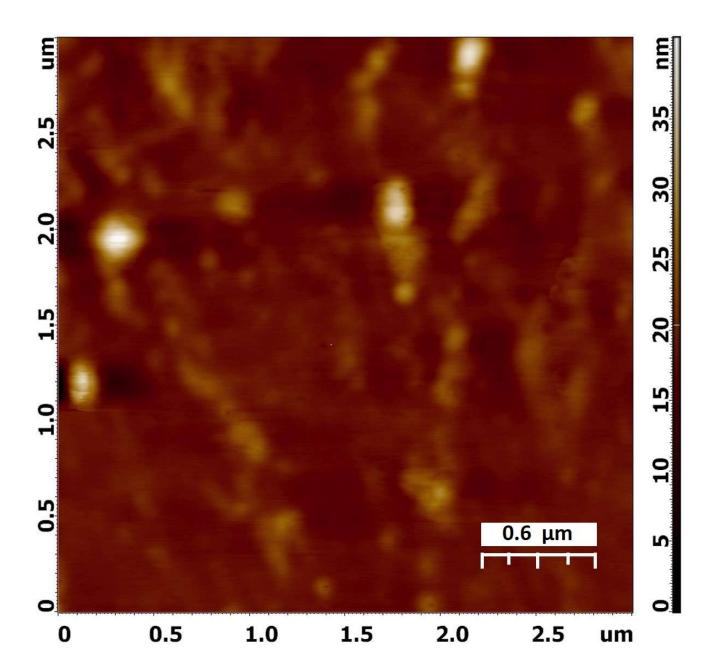


Рисунок 16 – Шилова

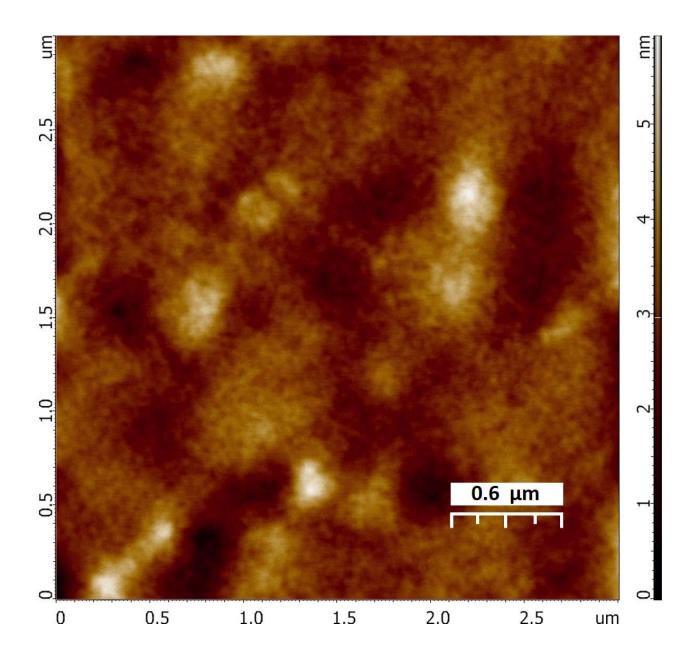


Рисунок 1в – Шилова

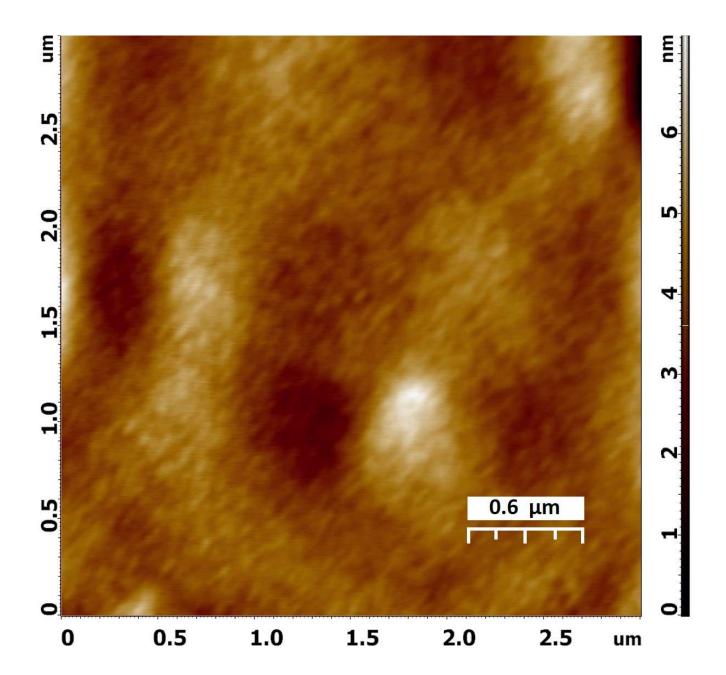


Рисунок 1г – Шилова

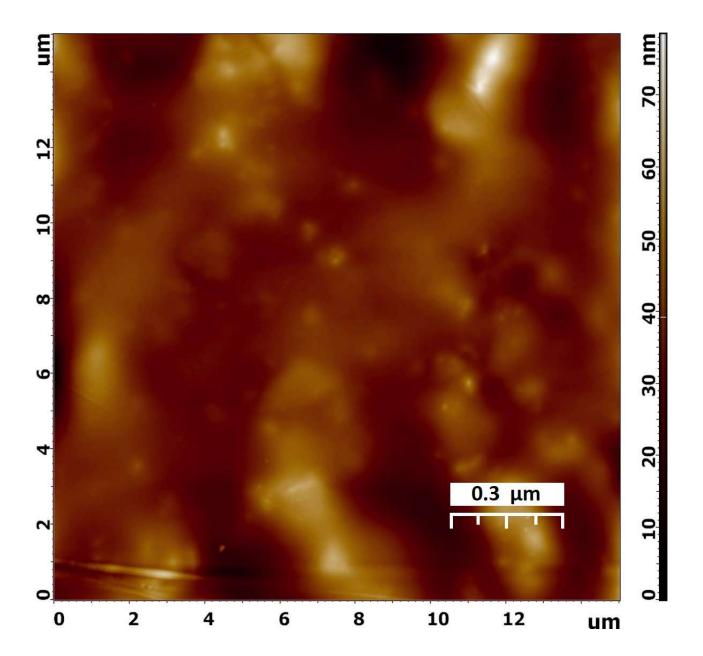


Рисунок 2а – Шилова

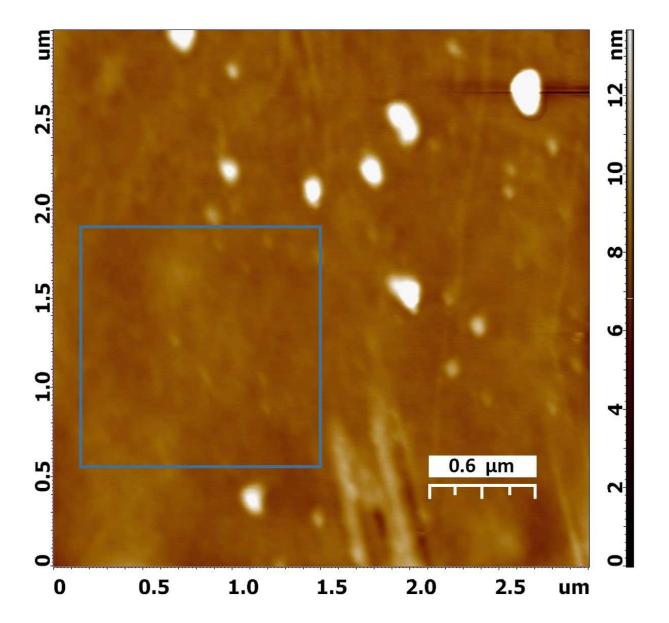


Рисунок 26 – Шилова