

Научная статья

УДК 667.6:535.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97

## КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ СИСТЕМ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ\* Часть 2. Влияние различных климатических зон

В.О. Старцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Показано различие в изменении цветового расстояния образцов алюминиевого сплава с нанесенной эпоксидной и фторполиуретановой эмалями с пигментами красного и серого цвета при экспонировании в климатических зонах умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата. Рассчитаны параметры временной экспоненциальной модели, описывающей изменение цветового расстояния. Обнаружено существенное отличие изменения цветового расстояния в умеренном и умеренно теплом климате от значений данного показателя в сухом субтропическом климате.

**Ключевые слова:** климатическое старение, лакокрасочное покрытие, цветовое расстояние, солнечная радиация, математическое моделирование, прогнозирование

**Для цитирования:** Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 2. Влияние различных климатических зон // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97.

Scientific article

## CLIMATE AGING OF PAINT COATING SYSTEMS Part 2. Influence of different climatic zones

V.O. Startsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The second part of the article series on climatic aging of paint coating systems shows the difference in the change in the color distance of aluminum alloy samples with applied epoxy and fluoropolyurethane enamels with red and gray pigments when exposed to climatic zones of moderate, moderately warm and dry subtropical climates. The article provides the calculation of parameters of the time exponential model describing the change in the color distance. As a result there has been found a significant difference in the change in the color distance in moderate and moderately warm climate from the same indicators of a dry subtropical climate.

**Keywords:** climatic aging, paint coating, color distance, solar radiation, mathematical modeling, forecasting

**For citation:** Startsev V.O. Climate aging of paint coating systems. Part 2. Influence of different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97.

---

\* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (147), 2025.

### Введение

Системы лакокрасочных покрытий (ЛКП), защищающие поверхность материалов от климатического воздействия [1, 2], изменяют свои цветовые и декоративные показатели вследствие сочетания физических и химических превращений. В научнотехнической литературе рассмотрены разнообразные колориметрические, спектрометрические, электрохимические и другие тонкие физические методы, которые позволяют выявить механизмы физико-химических превращений в ЛКП под действием температуры, влажности, ультрафиолетовых компонентов солнечной радиации [3].

Механизмы этих превращений рассмотрены в работах [4–6]. Например, во фторполиуретановом покрытии, нанесенном на стеклопластик, под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца активируются процессы деструкции и сшивки [4]. Методом динамического механического анализа показано, что релаксационный максимум динамического модуля потерь является суперпозицией  $\alpha_1$ -,  $\alpha_2$ -,  $\alpha_3$ -переходов, относящихся к переходам из стеклообразного в высокоэластическое состояние эмали ВЭ-69 и эпоксидной грунтовки ЭП-0215. Температура перехода  $\alpha_1$ , являющаяся температурой стеклования фторполиуретана ВЭ-69, после 3 лет экспозиции уменьшается пропорционально среднегодовой температуре воздуха региона. Температуры переходов  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  после натурной экспозиции вследствие доотверждения повысились на 13–15 °С и приобрели стабильные значения вне зависимости от климатических условий испытаний. Чувствительность методов динамического механического и термомеханического анализа позволяет выявить подобные эффекты в тонких слоях покрытий и грунтовок, а также оценить влияние их состава на атмосферостойкость ЛКП [4–6]. Химические превращения в ЛКП зависят от температуры их поверхности в открытых натуральных условиях [7] и сопровождаются изменениями показателей влагопереноса, влияющих на уровень свойств защищаемых материалов [8].

Для применяемых в авиационной промышленности материалов востребованы полиуретановые покрытия для защиты от абразивных воздействий и эрозионного износа, модифицированные эпоксидные покрытия с улучшенными эксплуатационными свойствами [9], покрытия с повышенной износостойкостью [10]. Проведенные климатические испытания эпоксидных и фторполиуретановых покрытий [11, 12] позволили выявить ряд особенностей старения в различных климатических зонах. В частности, показано, что в условиях влажных тропиков наблюдается более высокая скорость снижения декоративных свойств. Исследование изменения декоративных свойств, таких как блеск и колориметрические показатели, часто используется при проведении климатических испытаний для оценки старения материалов. В работе [13] исследованы особенности старения покрытия на основе акриловой смолы при добавлении органических пигментов различных цветов и без них. Показано, что морфология поверхностей образцов зависит от наличия пигментов. Покрытия, не содержащие пигмента, менее стойкие к старению в открытых атмосферных условиях.

В работе [14] представлены результаты масштабного исследования старения нескольких систем ЛКП, нанесенных на зеркала, в двух климатических зонах Марокко (морское побережье и пустыня) в течение 22 мес. Старение оценивали методом инфракрасной спектроскопии и путем контроля изменения колориметрических показателей. Анализ изменений в различных климатических зонах показал, что химическая деградация покрытий вызвана воздействием не только солнечной радиации, но и влажности, осадков, эрозии. Для исследования влияния каждого фактора необходимо проведение ускоренных климатических испытаний для прямого сравнения с результатами натуральных испытаний. Поиск достоверных соответствий между результатами натуральных и ускоренных испытаний является предметом исследований многих работ [15–23].

В работе [24] приведены результаты исследования цветовых показателей алкидных, эпоксидных и полиуретановых систем ЛКП, нанесенных на стальные образцы, при натуральных климатических испытаниях в условиях тропического климата. Полученные зависимости изменения цветовых показателей в сочетании с результатами других исследований позволили ранжировать покрытия по защитной способности и выявить необходимость изучения отдельных факторов, таких как температура нагрева, циклы увлажнения поверхности образцов и др.

В работе [25] представлена система ускоренных климатических испытаний стальных образцов с эпоксидными и полиуретановыми покрытиями для имитации натурального экспонирования в условиях тропического климата. Исследования изменения адгезии и цветовых показателей позволили определить режимы имитационных испытаний с наилучшим соответствием с результатами натуральных климатических испытаний.

Цель данной статьи – исследование изменения цветовых показателей ЛКП с фторполиуретановой и эпоксидной эмалями с добавлением пигментов красного и серого цвета при экспонировании в условиях умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата в течение 2 лет.

### Материалы и методы

Для проведения масштабных исследований климатического старения систем ЛКП изготовлено 700 образцов. В качестве подложки использован алюминиевый деформируемый сплав, из листа которого методом гидроабразивной резки подготовлены образцы размером 150×75×1 мм. Образцы подвергли сернокислотному оксидированию с последующим наполнением в хромпике. После этого на поверхность образцов нанесено два грунтовых слоя холодной и горячей сушки. Все образцы разделены на четыре группы по 175 образцов. На образцы групп 1 (маркировка 1–175) и 2 (маркировка 176–350) нанесено фторполиуретановое покрытие ВЭ-69 с добавлением пигментов красного и серого цвета соответственно. На образцы групп 3 (маркировка 351–525) и 4 (маркировка 526–700) нанесено эпоксидное покрытие ЭП-140 с добавлением пигментов красного и серого цвета соответственно. Пример наборов образцов из групп 1 и 2 показан на рис. 1.



Рис. 1. Образцы алюминиевого сплава с нанесенной системой лакокрасочного покрытия на основе фторполиуретановой эмали ВЭ-69 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета

Часть образцов выставлена на натурное экспонирование в условиях умеренного, умеренно теплого [26, 27] и сухого субтропического климата в начале весеннего сезона (март 2022 г.). Внешний вид стендов показан на рис. 2, а основные показатели климатических зон за период экспонирования приведены в табл. 1.



Рис. 2. Образцы алюминиевого сплава с нанесенными системами лакокрасочных покрытий на стендах для проведения экспонирования в условиях умеренного (а), умеренно теплого (б) и сухого субтропического климата (в)

Таблица 1

**Климатические показатели умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата за период проведения испытаний**

Показатель	Значения показателя для климата		
	умеренно теплого	умеренного	сухого субтропического
Среднегодовая температура воздуха, °С	14,8	7,6	20,3
Среднегодовая относительная влажность воздуха, %	73	72	27
Годовое суммарное количество осадков, мм	665	517	52
Годовое количество дней с осадками, сут	108	212	11
Годовое количество дней с пыльными явлениями, сут	–	–	52
Годовое суммарное количество солнечного сияния, ч	2375	1731	3381
Годовая величина суммарной солнечной радиации, МДж/м <sup>2</sup>	5030	4405	10765

В сухом субтропическом климате обращают на себя внимание высокая среднегодовая температура воздуха (20,3 °С), экстремально низкие среднегодовая относительная влажность воздуха (27 %) и суммарное количество осадков (52 мм), а также высокое значение годовой величины солнечной радиации (10765 МДж/м<sup>2</sup>).

При натурном экспонировании с помощью спектрофотометра со сферической геометрией измерения в соответствии с ГОСТ Р 71216–2024 еженедельно определяли значения различия цвета, светлоты, цветового тона систем ЛКП на образцах и рассчитывали значение полного цветового различия (цветового расстояния)  $\Delta E$  в системе CIE L\*a\*b\*.

Полученные значения цветового расстояния аппроксимировали с помощью соотношения [28, 29]

$$\Delta E = \Delta E_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1)$$

где  $\Delta E_{\max}$  – предельное значение цветового расстояния, усл. ед.;  $t$  – продолжительность экспонирования, сут;  $\tau$  – параметр, характеризующий срок достижения  $0,63\Delta E_{\max}$ , сут.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны изменения цветового расстояния системы ЛКП на основе эмали ЭП-140 при открытом натурном экспонировании в трех климатических зонах, на рис. 4 – аналогичные зависимости для ЛКП на основе эмали ВЭ-69.

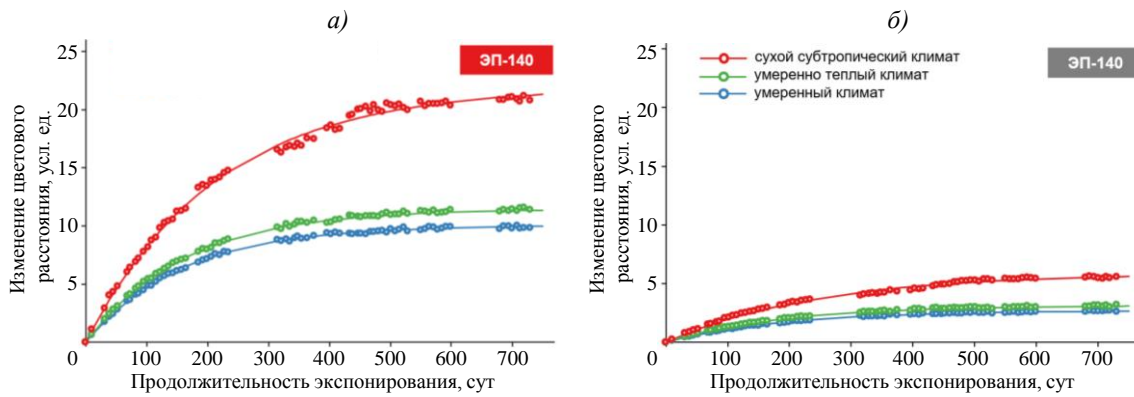


Рис. 3. Изменения цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эмали ЭП-140 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета при натуральных климатических испытаниях в трех климатических зонах: точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

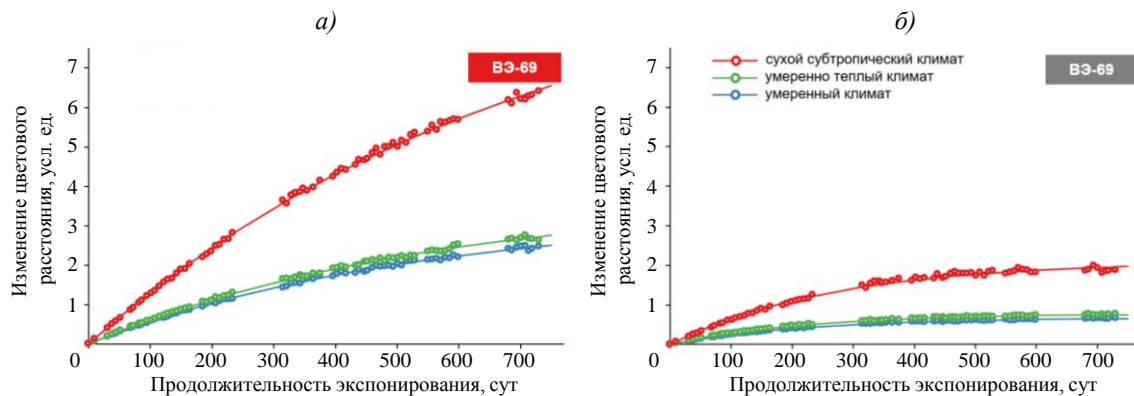


Рис. 4. Изменения цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эмали ВЭ-69 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета при натуральных климатических испытаниях в трех климатических зонах: точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

Значение изменения цветового расстояния за двухлетний период экспонирования системы ЛКП на основе эмали ЭП-140 существенно зависит от цвета пигмента: диапазон  $\Delta E$  для образцов с пигментом красного и серого цвета составляет 10,11–20,79 и 2,00–5,55 усл. ед. соответственно. Таким образом, изменение цветового расстояния различается в 3,4–3,7 раза, причем наибольшее отличие зафиксировано для образцов, которые экспонировали в условиях сухого субтропического климата. Цветовое расстояние системы с красным пигментом изменяется в основном в первый год экспонирования. В сухом субтропическом климате это изменение составило 85 % от изменения цвета за весь период экспонирования, в умеренном и умеренно теплом – более 90 %.

Для системы ЛКП на основе эмали ЭП-140 с серым пигментом отмечено снижение этого соотношения. В сухом субтропическом климате в течение первого года наблюдается 80 % изменения цветового расстояния от изменения цвета за весь период экспонирования, в умеренном и умеренно теплом: 87 %.

Изменение цветового расстояния системы ЛКП с эмалью ВЭ-69 при натурном экспонировании значительно меньше, чем у системы ЛКП на основе эмали ЭП-140. При экспонировании в сухом субтропическом климате изменение цветового расстояния системы на основе эмали ВЭ-69 и с красным, и с серым пигментом меньше в 3 раза по

сравнению с аналогичным изменением для системы на основе эмали ЭП-140. При экспонировании в умеренном и умеренно теплом климате аналогичные показатели различаются в 4 раза.

Изменение цветового расстояния ЛКП на основе эмали ВЭ-69 в первый год экспонирования также отличается от значений данного показателя для системы с эмалью ЭП-140: во всех климатических зонах наблюдается 60–65 % от общего изменения за весь срок экспонирования при добавлении красного пигмента, 80 % – при использовании серого пигмента. Следует отметить, что изменение цвета в системах с добавлением серого пигмента при экспонировании во всех климатических зонах и с добавлением красного цвета при экспонировании в условиях умеренного и умеренно теплого климата в течение 2 лет не превышает 2,7 усл. ед., т. е. не наблюдается невооруженным глазом. Это свидетельствует о высокой стойкости ЛКП.

Рассчитанные параметры модели (1) для экспериментальных данных указаны в табл. 2. Как видно, модель (1) адекватно описывает экспериментальные данные. Коэффициент детерминации составляет 0,97–0,99, значение среднеквадратичной ошибки: 0,01–0,14.

Таблица 2

Параметры модели (1) по данным за весь период натурального экспонирования в трех климатических зонах

Эмаль	Цвет пигмента	Климат	$\Delta E_{\max}$ , усл. ед.	$\tau$ , сут	MSE	$R^2$
ЭП-140	Красный	Сухой субтропический	21,96	213	0,14	0,97
		Умеренно теплый	11,46	162	0,03	0,98
		Умеренный	10,06	158	0,03	0,98
	Серый	Сухой субтропический	5,89	246	0,12	0,97
		Умеренно теплый	3,13	186	0,02	0,98
		Умеренный	2,71	190	0,02	0,98
ВЭ-69	Красный	Сухой субтропический	10,21	731	0,08	0,98
		Умеренно теплый	3,72	555	0,02	0,99
		Умеренный	3,32	534	0,02	0,99
	Серый	Сухой субтропический	2,36	388	0,05	0,98
		Умеренно теплый	0,78	221	0,01	0,99
		Умеренный	0,38	227	0,01	0,99

Примечание.  $\Delta E_{\max}$  – предельное значение цветового расстояния;  $\tau$  – параметр, характеризующий срок достижения  $0,63\Delta E_{\max}$ ; MSE – среднеквадратичная ошибка;  $R^2$  – коэффициент детерминации.

Ранее показано, что основным воздействующим фактором при изменении цветового расстояния систем ЛКП при натурном экспонировании является доза солнечной радиации. На рис. 5 приведена диаграмма накопленной дозы солнечной радиации в различных климатических зонах. В сухом субтропическом климате величина накопленной дозы солнечной радиации в 2 раза превышает значения для умеренного и умеренно теплого климата. Кроме того, отчетливо наблюдается сезонность: скорость накопления дозы солнечной радиации снижается в осенне-зимний период и увеличивается в весенне-летний период. Анализ метеоданных за двухлетний период показывает, что в умеренном климате в весенне-летний период накапливается 85 % от годовой дозы солнечной радиации, в осенне-зимний период: 15 %. В умеренно теплом климате это соотношение составляет 70 и 30 %, а в сухом субтропическом: 60 и 40 % соответственно.

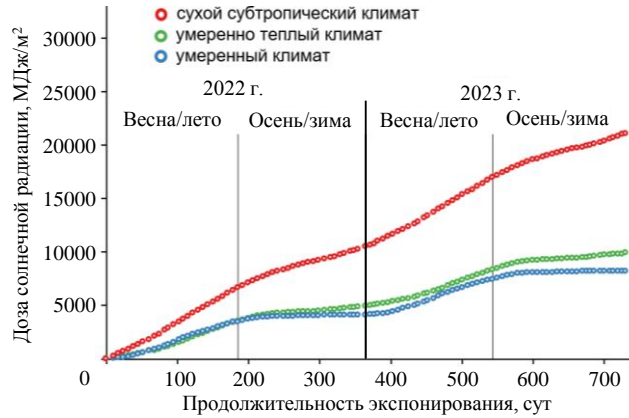


Рис. 5. Зависимости накопления дозы солнечной радиации от продолжительности экспонирования лакокрасочных покрытий в умеренном, умеренно теплом и сухом субтропическом климате

Характер зависимостей изменения цветового расстояния исследованных систем ЛКП от поглощенной дозы солнечной радиации (рис. 6 и 7) отличается от временных зависимостей (рис. 3 и 4).

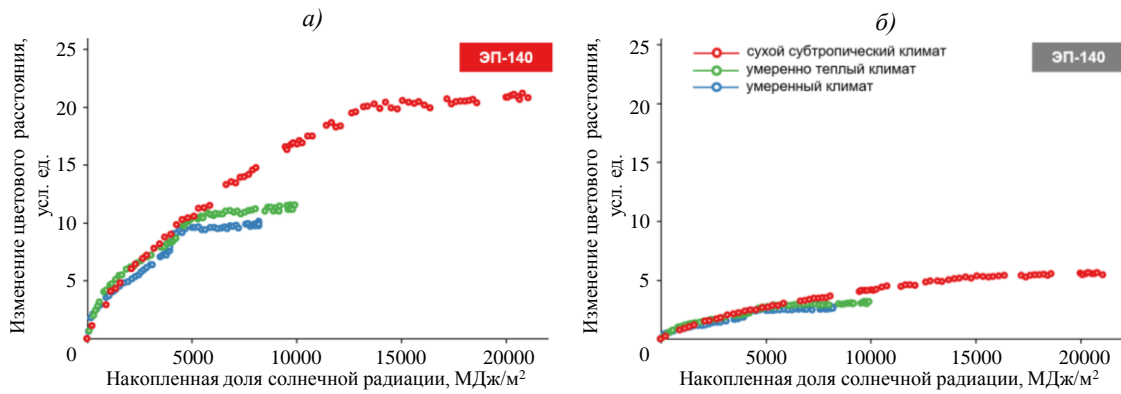


Рис. 6. Зависимости изменения цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эмали ЭП-140 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета при натуральных климатических испытаниях в трех климатических зонах от накопленной дозы солнечной радиации

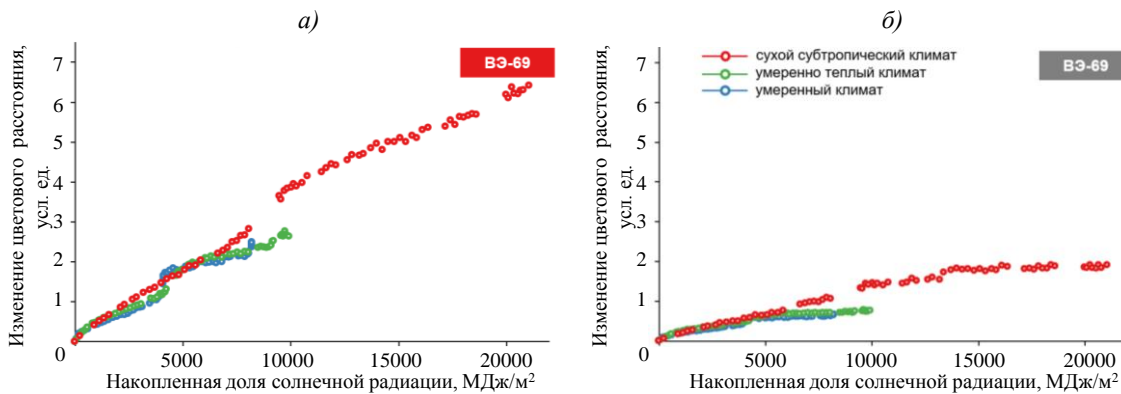


Рис. 7. Зависимости изменения цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эмали ВЭ-69 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета при натуральных климатических испытаниях в трех климатических зонах от накопленной дозы солнечной радиации

Для всех исследованных систем ЛКП с различными пигментами наблюдается одинаковый характер изменения цветового расстояния до набора дозы солнечной радиации  $\sim 3500$  МДж/м<sup>2</sup> во всех климатических зонах. После этого значения характер изменения цветового расстояния в умеренном и умеренно теплом климате остается схожим, а в сухом субтропическом климате значительно изменяется. Использование модели (1) для аппроксимации экспериментальных данных с дозой накопленной радиации в качестве аргумента показывает, что среднеквадратичная ошибка возрастает до 0,26–0,87, а коэффициент детерминации снижается до 0,74–0,83. Это означает, что, помимо солнечной радиации, есть другие значимые факторы воздействия, влияющие на изменение цветовых показателей в сухом субтропическом климате. Согласно данным табл. 1, в сухом субтропическом климате в течение года наблюдается более 50 дней с пыльными явлениями. Возможно, дополнительное воздействие песка и пыли в сухом субтропическом климате, незначительное в первые 3,5 мес. (за период накопления дозы солнечной радиации до 3500 МДж/м<sup>2</sup>), становится значимым при дальнейшем экспонировании. Дополнительным аргументом в пользу этой гипотезы является тот факт, что характер кривых изменения цветового расстояния для умеренного и умеренно теплого климата одинаков. Для достоверного подтверждения этой гипотезы будут проведены дополнительные исследования влияния песка и пыли на изменение цветового расстояния систем ЛКП.

### Заключения

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- климатическая стойкость, проанализированная по изменению цветового расстояния, ЛКП на основе фторполиуретановой эмали в 3–4 раза больше, чем систем с эпоксидной эмалью;
- экспериментальные данные изменения цветового расстояния адекватно описываются с помощью предложенной экспоненциальной модели;
- изменения цветового расстояния исследованных систем покрытия в сухом субтропическом климате в 2–4 раза больше, чем в умеренном и умеренно теплом климате;
- характер изменения цветового расстояния в координатах накопленной дозы солнечной радиации одинаков на начальной стадии экспонирования в трех климатических зонах;
- значимым фактором, влияющим на изменение цветового расстояния, помимо накопленной дозы солнечной радиации, является воздействие песка и пыли.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 6. С. 32–35.
2. Ерофеев В.Т., Смирнов И.В., Воронов П.В., Афонин В.В., Каблов Е.Н. и др. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // Фундаментальные исследования. 2016. № 11. С. 911–924.
3. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review // Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36. No. 4. P. 1–35.
4. Лебедев М.П., Старцев О.В., Коваль Т.В., Велигодский И.М. Мультиплетные релаксационные  $\alpha$ -переходы во фторуретановом покрытии после климатического старения // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2024. Т. 516. № 1. С. 45–51.

5. Старцев О.В., Махоньков А.Ю., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Исследование старения углепластика КМУ-4Л после 12 лет экспонирования на международной космической станции методом динамического механического анализа. 2. Влияние места расположения пластин в многослойных пачках // Вопросы материаловедения. 2013. № 4. С. 69–76.
6. Старцев О.В., Болонин А.Б., Вапиров Ю.М. и др. Улучшение вязкоупругих свойств акриловой эмали АС-1115 // Лакокрасочные материалы и их применение. 1986. № 4. С. 16–18.
7. Старцев О.В., Медведев И.М., Кротов А.С., Панин С.В. Зависимость температуры поверхности образцов от характеристик климата при экспозиции в натуральных условиях // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 7. С. 43–47.
8. Старцев О.В., Коваль Т.В., Кротов А.С., Велигодский И.М. Моделирование десорбции влаги из углепластика с защитными покрытиями после длительного климатического старения // Коррозия: материалы, защита: приложение к журналу «Технология металлов». 2024. № 17. С. 1–10.
9. Кузнецова В.А., Емельянов В.В., Шаповалов Г.Г., Коврижкина Н.А. Применение модификаторов для повышения эксплуатационных свойств лакокрасочных покрытий на основе эпоксидных пленкообразующих (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 12 (106). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-63-72.
10. Кузнецова В.А., Тимошина Е.А., Шаповалов Г.Г., Железняк В.Г. Тенденции в области разработки матовых износостойких лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-132-144.
11. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Кодаченко Е.Н., Железняк В.Г. Исследование влияния химической природы грунтовочного слоя на свойства системы покрытий на основе фторполиуретановой эмали // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 09. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
12. Меркулова Ю.И., Куршев Е.В., Вдовин А.И., Андреева Н.П. Микроструктурные и электрохимические исследования лакокрасочных покрытий в условиях натуральных климатических испытаний тропического климата Северной Америки // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 11. URL <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
13. Dao P.H., Nguen A.H., Mac V.P. et al. Aging of waterborne paint based on the acrylic resin emulsion and organic pigment // Vietnam Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 56. No. 3B. Art. 126.
14. Guerguer M., Naamane S., Edfouf Z. et al. Chemical degradation and color changes of paint protective coatings used in solar glass mirrors // Coatings. 2021. Vol. 11. No. 4. Art. 476.
15. Knudsen O.Ø., Skilbred A.W.B., Løken A. et al. Correlations between standard accelerated tests for protective organic coatings and field performance // Materials Today Communications. 2022. Vol. 31. Art. 103729.
16. Bierwagen G.P., He L., Li J. et al. Studies of a new accelerated evaluation method for coating corrosion resistance – thermal cycling testing // Progress in Organic Coatings. 2000. Vol. 39. No. 1. P. 67–78.
17. Li S., Be H., Weinell C.E. et al. A quantitative real-time evaluation of rust creep propagation in coating systems exposed to field testing and cyclic ageing test // Progress in Organic Coatings. 2023. Vol. 184. Art. 107866.
18. Pélissier K., Le Bozec N., Thierry D. et al. Evaluation of the Long-Term Performance of Marine and Offshore Coatings System Exposed on a Traditional Stationary Site and an Operating Ship and Its Correlation to Accelerated Test // Coatings. 2022. Vol. 12. No. 11. Art. 1758.
19. LeBozec N., Thierry D., Le Calvé P. et al. Performance of marine and offshore paint systems: Correlation of accelerated corrosion tests and field exposure on operating ships // Materials and Corrosion. 2015. Vol. 66. No. 3. P. 215–225.

20. Momber A.W., Buchbach S., Plagemann P. et al. Edge coverage of organic coatings and corrosion protection over edges under simulated ballast water tank conditions // *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 108. P. 90–92.
21. Pavlenko V., Manuylov V., Kuzhel V. et al. Research on testing methods for the corrosion resistance of paint coatings // *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. 2024. Vol. 18. No. 2. P. 127–133.
22. Revin P.O., Makarenko A.V., Harisov R.A. et al. Research of underwater applied coatings for corrosion protection of port facilities // *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2022. Vol. 12. No. 4. P. 385–393.
23. Saha J.K., Mitra P.K., Pau S. et al. Performance of different organic coatings on steel substrate by accelerated and in atmospheric exposure tests // *Indian Journal of Chemical Technology*. 2010. Vol. 17. No. 2. P. 102–110.
24. Chu M.T., Do D.T., Sereda V.N. et al. Correlation between climate testing methods and service life prediction for paint systems // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023. Vol. 12. No. 3. P. 1363–1373.
25. Gao J., Hu W., Wang R. et al. Study on a multifactor coupling accelerated test method for anticorrosive coatings in marine atmospheric environments // *Polymer Testing*. 2021. Vol. 100. Art. 107259.
26. Старцев В.О. Методы исследования старения полимерных связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. № 9. С. 16–26.
27. Старцев В.О., Молоков М.В., Старцев О.В. и др. Влияние алифатического разбавителя ЭТАЛ-1 на климатическую стойкость эпоксидных полимеров на основе смолы ЭД-20 // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. № 12. С. 26–36.
28. Старцев В.О., Коган А.М., Зеленева Т.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 1. Влияние длительных сроков экспонирования на цветовые показатели // *Труды ВИАМ*. 2025. № 5 (147). Ст. 08. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111.
29. Старцев В.О., Низина Т.А. Прогнозирование климатического старения эпоксидных полимеров по изменению цветовых показателей // *Труды ВИАМ*. 2015. № 12. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.

### References

1. Kablov E.N., Semenova L.V., Eskov A.A., Lebedeva T.A. Complex systems of paint and varnish coatings for the protection of metal polymer composite materials, as well as their contact joints from the effects of aggressive factors. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2016, no. 6, pp. 32–35.
2. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V., Afonin V.V., Kablov E.N. et al. Study of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 11, pp. 911–924.
3. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 1–35.
4. Lebedev M.P., Startsev O.V., Koval T.V., Veligodskiy I.M. Multiplet relaxation  $\alpha$ -transitions in a fluororethane coating after climatic aging. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh*, 2024, vol. 516, no. 1, pp. 45–51.
5. Startsev O.V., Makhonkov A.Yu., Deev I.S., Nikishin E.F. Study of aging of KМУ-4L carbon fiber reinforced plastic after 12 years of exposure on the International Space Station using the method of dynamic mechanical analysis. 2. Effect of plate location in multilayer stacks. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 4, pp. 69–76.
6. Startsev O.V., Bolonin A.B., Vapirov Yu.M. et al. Improving the viscoelastic properties of acrylic enamel AC-1115. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 4, pp. 16–18.
7. Startsev O.V., Medvedev I.M., Krotov A.S., Panin S.V. Dependence of the surface temperature of samples on the climate characteristics during exposure under natural conditions. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2013, no. 7, pp. 43–47.

8. Startsev O.V., Koval T.V., Krotov A.S., Veligodsky I.M. Modeling of moisture desorption from carbon fiber with protective coatings after long-term climatic aging. *Korroziya: materialy, zashchita: Supplement to the journal «Tekhnologiya metallov»*, 2024, no. 17, pp. 1–10.
9. Kuznetsova V.A., Yemelyanov V.V., Shapovalov G.G., Kovrizhkina N.A. Use of modifiers for increase of operational properties of paint coatings on the basis of the epoxy film-forming (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-63-72.
10. Kuznetsova V.A., Timoshina E.A., Shapovalov G.G., Zheleznyak V.G. Trends in the development of matte wear-resistant paint coatings. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-132-144.
11. Merkulova Yu.I., Kuznetsova V.A., Kodachenko E.N., Zheleznyak V.G. Study of the influence of the primer layer's chemical nature on the properties of the coating system based on fluoropolyurethane enamel. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
12. Merkulova Yu.I., Kurshev E.V., Vdovin A.I., Andreeva N.P. Microstructural and electrochemical studies of paint coatings under natural climate tests of tropical climate of North America. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
13. Dao P.H., Nguen A.H., Mac V.P. et al. Aging of waterborne paint based on the acrylic resin emulsion and organic pigment. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 2018, vol. 56, no. 3B, art. 126.
14. Guerguer M., Naamane S., Edfouf Z. et al. Chemical degradation and color changes of paint protective coatings used in solar glass mirrors. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 4, art. 476.
15. Knudsen O.Ø., Skilbred A.W.B., Løken A. et al. Correlations between standard accelerated tests for protective organic coatings and field performance. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 31, art. 103729.
16. Bierwagen G.P., He L., Li J. et al. Studies of a new accelerated evaluation method for coating corrosion resistance – thermal cycling testing. *Progress in Organic Coatings*, 2000, vol. 39, no. 1, pp. 67–78.
17. Li S., Be H., Weinell C.E. et al. A quantitative real-time evaluation of rust creep propagation in coating systems exposed to field testing and cyclic ageing test. *Progress in Organic Coatings*, 2023, vol. 184, art. 107866.
18. Pélissier K., Le Bozec N., Thierry D. et al. Evaluation of the Long-Term Performance of Marine and Offshore Coatings System Exposed on a Traditional Stationary Site and an Operating Ship and Its Correlation to Accelerated Test. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 11, art. 1758.
19. LeBozec N., Thierry D., Le Calvé P. et al. Performance of marine and offshore paint systems: Correlation of accelerated corrosion tests and field exposure on operating ships. *Materials and Corrosion*, 2015, vol. 66, no. 3, pp. 215–225.
20. Momber A.W., Buchbach S., Plagemann P. et al. Edge coverage of organic coatings and corrosion protection over edges under simulated ballast water tank conditions. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 108, pp. 90–92.
21. Pavlenko V., Manuylov V., Kuzhel V. et al. Research on testing methods for the corrosion resistance of paint coatings. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 2024, vol. 18, no. 2, pp. 127–133.
22. Revin P.O., Makarenko A.V., Harisov R.A. et al. Research of underwater applied coatings for corrosion protection of port facilities. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 385–393.
23. Saha J.K., Mitra P.K., Pau S. et al. Performance of different organic coatings on steel substrate by accelerated and in atmospheric exposure tests. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 102–110.

24. Chu M.T., Do D.T., Sereda V.N. et al. Correlation between climate testing methods and service life prediction for paint systems. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2023, vol. 12, no. 3, pp. 1363–1373.
25. Gao J., Hu W., Wang R. et al. Study on a multifactor coupling accelerated test method for anticorrosive coatings in marine atmospheric environments. *Polymer Testing*, 2021, vol. 100, art. 107259.
26. Startsev V.O. Methods for studying the aging of polymer binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 9, pp. 16–26.
27. Startsev V.O., Molokov M.V., Startsev O.V. et al. The effect of the aliphatic diluent ETAL-1 on the climatic resistance of epoxy polymers based on ED-20 resin. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2016, no. 12, pp. 26–36.
28. Startsev V.O., Kogan A.M., Zeleneva T.O. Climate aging of paint coating systems. Part 1. Effect of long-term exposure on color characteristics. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 19, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111.
29. Startsev V.O., Nizina T.A. The modeling of epoxy polymers weathering by the color characteristics measurements. *Trudy VIAM*, 2015, no. 12, paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.

**Информация об авторах**

**Старцев Валерий Олегович**, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Valery O. Startsev**, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.02.2025.  
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 18.02.2025.