

Научная статья

УДК 629.7.023.222:632.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-177-192

ТОКСИЧНОСТЬ МИКРОЧАСТИЦ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ***Часть 3. Оценка рисков, регулирование и перспективные материалы***А.Б. Лаптев¹, Г.Г. Матишов², Н.И. Булышева², А.А. Кривушина¹, В.О. Старцев¹*¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru²Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия; ssc-ras@ssc-ras.ru

Аннотация. Заключительная часть цикла статей посвящена оценке токсикологических рисков, современным мерам регулирования и разработке менее опасных лакокрасочных покрытий (ЛКП). Проанализированы данные о токсичности современных и перспективных составов ЛКП для судов, выявлены ключевые опасные компоненты. Представлен план управления рисками загрязнения микропластиком. Обсуждаются перспективы создания экологически безопасных ЛКП, включая водные дисперсии, бесбицидные, гидрофобные противообрастающие и содержащие наночастицы материалы.

Ключевые слова: биоцид, деградация покрытий, лакокрасочные материалы, микропластик, старение полимеров, токсичность, экология

Для цитирования: Лаптев А.Б., Матишов Г.Г., Булышева Н.И., Кривушина А.А., Старцев В.О. Токсичность микрочастиц лакокрасочных покрытий. Часть 3. Оценка рисков, регулирование и перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 177–192. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-177-192.

Scientific article

TOXICITY OF MICROPARTICLES OF PAINT COATINGS**Part 3. Risk assessment, regulation and prospective materials***A.B. Laptev¹, G.G. Matishov², N.I. Bulysheva², A.A. Krivushina¹, V.O. Startsev¹*¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru²Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia; ssc-ras@ssc-ras.ru

Abstract. The final part of the series of articles is devoted to the assessment of toxicological risks, modern regulatory measures and the development of less dangerous paint and varnish coatings. Data on the toxicity of modern and promising paint compositions for ships is analyzed, and key dangerous components are identified. A microplastic pollution risk management plan is presented. Prospects of creating environmentally friendly coatings, including aqueous dispersions, biocide-free and hydrophobic antifouling coatings, and nanoparticle materials, are discussed.

Keywords: biocide, degradation of coatings, paints and varnishes, microplastics, polymer aging, toxicity, ecology

For citation: Laptev A.B., Matishov G.G., Bulysheva N.I., Krivushina A.A., Startsev V.O. Toxicity of microparticles of paint coatings. Part 3. Risk assessment, regulation and prospective materials. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 177–192. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-177-192.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (159), 2026; часть 2 – см. «Труды ВИАМ», № 6 (160), 2026.

Введение

Современные подходы к снижению токсичности лакокрасочных покрытий (ЛКП) требуют комплексного решения, включающего как совершенствование нормативно-правовой базы, так и разработку новых безопасных материалов и технологий их применения. Возрастающая озабоченность проблемой загрязнения окружающей среды микропластиком, в том числе частицами ЛКП, обуславливает необходимость пересмотра традиционных подходов к разработке состава красок и управлению рисками на всех этапах их жизненного цикла.

Особо актуальна оценка совокупного токсического воздействия сложных смесей химических веществ, высвобождающихся из ЛКП. Существующие методы оценки риска, как правило, ориентированы на отдельные химические вещества, в то время как в реальных условиях окружающей среды организмы подвергаются воздействию сложных смесей загрязнителей. Это требует разработки новых методологических подходов и критериев оценки безопасности ЛКП.

В данной работе представлены анализ современных тенденций в области регулирования содержания опасных веществ в ЛКП и оценка токсикологических характеристик перспективных составов, а также рассмотрены планы управления рисками, направленные на минимизацию негативного воздействия микрочастиц ЛКП на окружающую среду и здоровье человека.

Меры по сокращению токсичности лакокрасочных покрытий

Регламент по охране окружающей среды (контролю за вредными веществами) 1992 г. ввел в действие директиву 89/677/ЕЕС, распространяющуюся на карбонат и сульфат свинца, а не на весь спектр свинцовых пигментов и осушителей. Годом позже в Великобритании приняли аналогичный документ, касающийся содержания кадмия в красках, который заменен Положениями о контроле за опасными веществами и препаратами 2006 г. и последующими поправками.

Регламент EC REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical – Регистрация, оценка, разрешение и ограничение химических веществ) вступил в силу в 2007 г., приложение XVII к регламенту – в 2009 г. Великобритания и страны ЕС приняли регламент REACH, который основан на более сложном подходе и не устанавливает максимальные нормы содержания свинца в строительных красках, однако разрешает использование соединений свинца с учетом ограничений, указанных на маркировке. Другие страны придерживались прагматичной точки зрения, признающей, что вредное воздействие оказывают именно ионы свинца, и ограничили общее содержание свинца в красках от 0,009 до 0,06 % (от 90 до 600 мг/кг), учитывая наличие примесей в ингредиентах [1].

Хромат свинца, желтый сульфохромат свинца и сульфат молибдата хромата свинца подлежат разрешительной процедуре, которая в настоящее время все еще допускает их специальное использование (например, для дорожной разметки).

Получены данные, подтверждающие, что при удалении краски с содержанием свинца $\leq 0,25$ % может образовываться недопустимый уровень свинцовой пыли [2].

Важно отметить, что свинец, содержащийся в красках или лаках в количестве 1 % (10000 мг/кг) или даже 0,1 % (1000 мг/кг), все равно опасен. Масштаб риска также зависит от уровня и типов других присутствующих токсичных и тяжелых металлов, количества и толщины слоя краски, используемого метода ее нанесения или удаления, а также от мер, принимаемых для защиты персонала, деятельность которого связана с такими красками, или от уровня загрязнения, возникающего в результате этой работы.

Если факторы риска известны, можно применить стандартные модели для надежной оценки риска и определения мер, необходимых для его минимизации на конкретном объекте (например, Постановление о контроле за опасными веществами

(Control of Substances Hazardous to Health – COSHH)). При высокой степени опасности следует поддерживать воздействия на низком уровне. Степень снижения зависит от вероятности причинения вреда и осведомленности о вредных последствиях воздействия. Меры контроля должны быть направлены на устранение как острых, так и хронических рисков для здоровья.

Подходы к оценке риска при загрязнении окружающей среды приведены на рисунке.

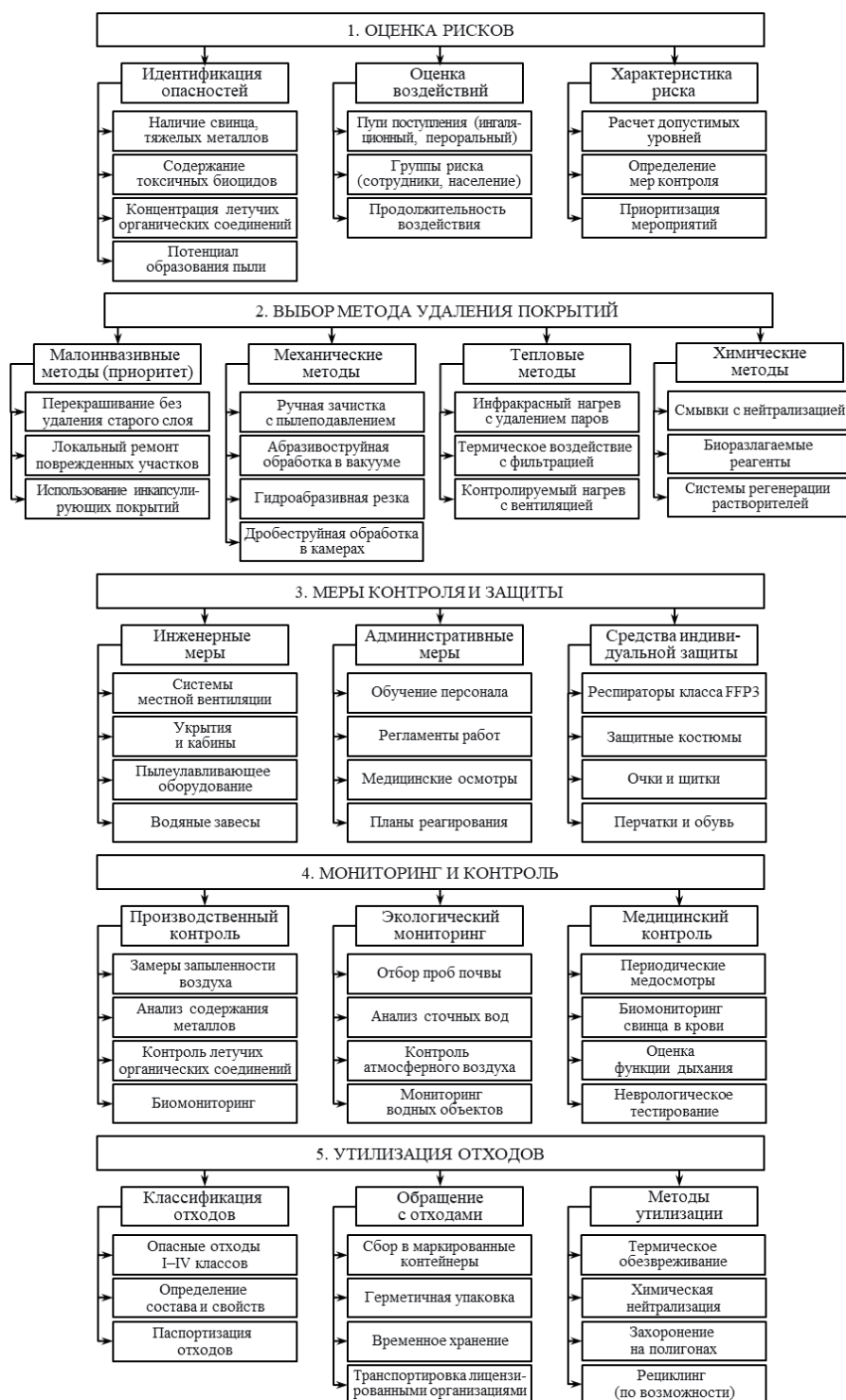


Схема управления рисками при работе с лакокрасочными покрытиями

Необходимо оценить и понять риски, связанные с ЛКП, до начала работ, чтобы эффективно управлять ими. Однако существует возможность искажения реальных рисков с целью доказательства избыточного или, наоборот, уменьшенного вреда переработки ЛКП, содержащих свинец. К расчетам следует относиться с осторожностью, поскольку надлежащая оценка рисков требует более разностороннего подхода [3].

Токсикологическая характеристика современных лакокрасочных покрытий

Разработчики составов ЛКП, как правило, кроме достижения определенных декоративных свойств, преследуют конкретную цель (технологичность, долговечность, экологичность и безопасность).

Проанализирована база данных патентов с портала <https://worldwide.espacenet.com/> по ключевым словам «лакокрасочный материал», «краска», «состав». Из >1500 патентов выбраны новые с наиболее открытым составом. В табл. 1 приведены примеры 15 составов лакокрасочных материалов.

Таблица 1

Токсикологическая опасность компонентов лакокрасочных покрытий

Исходный состав	Опасный компонент	Вред для организма (при вдыхании/контакте)	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Класс опасности	Нормативный источник
Состав компонента А, %: 48–60 – кремнийорганическая акриловая смола, 18–25 – TiO ₂ , 3–5 – BaSO ₄ , 3–6 – слюда, 3–5 – тальк, 0,3–0,8 – технический углерод, тиксотропный агент, диспергатор, пеногаситель, 6–12 – растворитель. Компонент В – биуретполиизоцианат (10–16 % от компонента А)	TiO ₂ (пыль)	Канцероген (группа 2В по классификации МАИР). При вдыхании наночастиц оказывает фиброгенное действие, риск рака легких	10 (в пересчете на Ti)	3–4	[4]
	BaSO ₄ (пыль)	Вызывает раздражение дыхательных путей, при хроническом воздействии – баритоз (доброкачественный пневмокониоз)	0,5 (в пересчете на Ba ²⁺ по СанПиН 1.2.3685–21)	3	[4]
	Изоцианаты (биуретполиизоцианат)	Сильный сенсибилизатор, при вдыхании аэрозоля высокотоксичен, вызывает астму, дерматиты, бронхит	0,02 (по толуолдиизоцианату)	1	ГН 2.2.5.353 2–18
	Растворитель (смесь), вероятно, на основе ксилола/толуола	Поражает центральную нервную систему, печень, почки, кожу	50 (по ксилолу)	3	[1, 4]
Состав, %: 12–14 – ненасыщенный органический кремний, 16–18 – винилакрилат, 26–28 – бутилакрилат, 37–39 – винилацетат, 21–25 – стирол, 52–55 – неорганическая соль	Стирол	Мутаген. Поражает кровеносные органы, центральную нервную систему, печень, вызывает раздражение слизистых	30/10 (максимальная/среднесменная)	3	[1, 4]
	Бутилакрилат	Имеет резкий запах, вызывает раздражение глаз и дыхательных путей, дерматиты, наркотическое действие	0,5 (ориентировочно по данным ЕСНА)	3	Справочник*
	Винилацетат	Канцероген (группа 2В) при высоких концентрациях, вызывает раздражение слизистых, угнетение центральной нервной системы	0,1 (США, NIOSH), в РФ не утверждена	–	PubChem

Продолжение таблицы 1

Исходный состав	Опасный компонент	Вред для организма (при вдыхании/контакте)	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Класс опасности	Нормативный источник
Состав, ч.: 5–50 – алкидная смола модифицированная (полиуретан), 5–30 – органический растворитель, 1–7 – осушитель, 1–35 – пигмент, 1–12 – добавки	Органический растворитель (уайт-спирит, сольвент)	Обезжиривание кожи приводит к дерматитам, экземам. В высоких концентрациях является наркотическим веществом, поражает печень	300 (в пересчете на С)	4	[1–4]
	Осушитель (сиккатив) – соли Co, Mn, Pb, Zn	Со – аллерген, кардиотоксикант, Mn поражает центральную нервную систему (паркинсонизм), Pb – нейротоксин	0,5; 0,2 и 0,01 (по Co, Mn и Pb соответственно)	1–2	ГН 2.2.5.353 2–18
Система Zn–Al–Mg–RE (RE – редкоземельный элемент), кремнийорганическое соединение/фтор, оксид меди, изотиазолиноны, триазины, пиридилтиофенолоксид Cu/Zn	CuO	Оказывает общетоксическое действие, вызывает поражение печени, гемолиз, при вдыхании – литейную лихорадку	0,5 (по Cu)	2	ГН 2.2.5.353 2–18
	Изотиазолиноны (например, бензизотиазолинон)	Сильный аллерген, эндокринный дизраптор, вызывает контактный дерматит, бронхоспазм	0,1 (в пересчете на бензизотиазолинон)	–	[13]
	Триазины (иргарол 1051)	Токсичен для водорослей, возможно, является эндокринным дизраптором	Не установлена (биоцид)	–	[9]
Водорастворимая алкидная смола (40–60 ч.), мезопористый SiO ₂ (1–2 ч.), аминосилановое связующее (10–20 ч.), пигменты, нитрат церия (0,1–0,5 %), УФ-поглотитель, pH-регулятор, усилитель адгезии, осушитель, загуститель, вода (10–15 ч.)	Ce(NO ₃) ₃	Токсичен при вдыхании пыли, вызывает раздражение кожи и глаз, кумулируется в легких	0,1 (в пересчете на Ce)	3	МУ 1.2.3685–21
	Аминосилан (3-аминопропилтриэтоксисилан)	Вызывает раздражение кожи и дыхательных путей, аллергию	Не утверждена (~2)	–	[10]
Кремнийорганическая смола, этилцеллюлоза, золь кремнезема, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, этилакрилат, гидроксиэтилакрилат, глицидилметакрилат, наночастицы TiO ₂ и Al ₂ O ₃ , пропиленгликоль, фторированный этиленпропилен, полиэфирэфиркетон, вода, этанол	Этилакрилат	Наркотическое вещество, канцероген (2B). Имеет резкий запах. Вызывает сильное раздражение глаз, кожи, дыхательных путей	5 (по акриловой кислоте – близкий аналог)	3	[11]
	Глицидилметакрилат	Мутаген <i>in vivo</i> , сильный аллерген, канцероген (группа 2A – высокая вероятность)	0,5 (рекомендованная)	2	Справочник*
	γ-Al ₂ O ₃	Оказывает легкое фиброгенное действие при хроническом вдыхании, возможно канцерогенное действие	2 (по пыли Al ₂ O ₃)	4	ГН 2.2.5.3532–18

Исходный состав	Опасный компонент	Вред для организма (при вдыхании/контакте)	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Класс опасности	Нормативный источник
Полиуретан на водной основе (63–66 ч.), фенольная смола (24–27 ч.), политрифторхлорэтилен (12–15 ч.), активный силикат кальция (15–18 ч.), карбонат кальция (5–7 ч.), сульфат бария (4–5 ч.), сепиолит (11–13 ч.), алюминий-циркониевое связующее TL-4, отвердитель, противогрибковый агент, пигменты (20–23 ч.)	Фенольная смола (свободный фенол)	Наркотическое вещество. Вызывает поражение центральной нервной системы, печени, почек, кожные ожоги, дерматиты	0,3	2	[1, 4]
	При нагреве до температуры >260 °С в результате пиролиза политрифторхлорэтилена выделяется перфторизобутилен (смертелен)	В обычных условиях инертен. При нагревании в 1,5 раза токсичнее фосгена. Вызывает отек легких	0,0005 (по продуктам пиролиза)	1	RTECS
	Zr в связующем (TL-4)	Оказывает легкое фиброгенное действие, вызывает гранулемы в легких при длительном вдыхании	1 (по Zr)	3	ГН 2.2.5.353 2–18
Состав, ч.: 10–15 – цинкакрилатная смола, 15–20 – силанакрилатная смола с расщепленной цепью, 30–50 – канифоль, 30–50 – противообрастающее средство, 1–3 – тиксотропное средство, 3–5 – пигмент, 5–10 – растворитель	Канифоль (абиебиновая кислота)	Вызывает астму (канифольная астма), аллергический дерматит. При нагревании раздражает дыхательные пути	2 (как органическая пыль)	4	Справочник*, [14]
	Zn в цинкакрилате	Вызывает лихорадку при вдыхании паров, поражение желудочно-кишечного тракта	0,5 (по Zn)	2	ГН 2.2.5.353 2–18
Состав, %: 26–30 – стирольно-акриловая эмульсия, 22–25 – эпоксидная смола, 21–25 – акриловая смола, 6–8 – стабилизатор ржавчины, 20–40 – наполнитель, 0,4–0,6 – диспергатор, 0,5–0,8 – пеногаситель, 4–6 – связующее	Эпоксидная смола (жидкая – бисфенол А/Ф и эпихлоргидрин)	Канцероген (группа 2А), аллерген, гепатотоксин. Вызывает контактный дерматит	0,5 (по смоле)	2	ГН 2.2.5.353 2–18
	Стабилизатор ржавчины (нитрит натрия, фосфаты цинка)	Нитрит натрия – метгемоглобинообразователь	0,1	2	[15]
Состав, ч.: 100–120 – акрилатная эмульсия, 0,5–1 – пеногаситель, 5–7 – коалесцент, 0,3–0,5 – загуститель, 1–1,5 – диспергатор, 20–25 – пигмент, 30–40 – слюда, 10–20 – вода	Коалесцент (тексанол, эфиры пропилгликоля)	Вызывает раздражение глаз и дыхательных путей, угнетение центральной нервной системы	2 (по пропиленгликолю)	3	ЕСНА, [16]

Окончание таблицы 1

Исходный состав	Опасный компонент	Вред для организма (при вдыхании/контакте)	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Класс опасности	Нормативный источник
Состав, %: 40–61 – полимер, 37–55 – биоцид для судов, 2–12 – консервант, 2–8 – антимикробный агент	Биоцид (например, медь и цинк-пиритион)	Cu оказывает общетоксическое действие, вызывает поражение печени, гемолиз, лихорадку – при вдыхании. Пиритион – нейротоксин, токсичен для водной фауны (особенно мидий)	0,5 (по Cu)	2	ЕРА, [17]
Эпоксидная смола, полиэфирсульфон, аминный отвердитель, силановое связующее, наполнитель, пигмент, пеногаситель, выравниватель, диспергатор, вода	Аминный отвердитель (диэтилентриамин и др.)	Вызывает ожоги кожи и глаз, при вдыхании – токсический отек легких, астму	1 (по аминам)	2	[18]
Состав, ч: 4–20 – эпоксидная смола, 10–30 – эпоксидно-акриловая смола, 35–60 – пигмент, 1–2 – тиксотропный агент, 20–40 – растворитель, 20–50 – отвердитель	Эпоксидно-акриловая смола	Акрилаты вызывают раздражение глаз и дыхательных путей, дерматиты, оказывают наркотическое действие. Эпоксидная смола – канцероген (группа 2А), аллерген, гепатотоксин, вызывает контактный дерматит. Комбинация усиливает аллергенный потенциал	0,5	2	[19]
Состав, ч.: 40–60 – эпоксидная смола, 5–15 – модифицированный базальтовый композит, 3–8 – оксид цинка/графен, 10–18 – наполнитель, вода	ZnO, графен	ZnO – классический токсикант (вызывает лихорадку). Графен вызывает фиброгенный эффект, воспаление легких (по данным нанотоксикологии)	0,5 (по Zn), 0,01 (по графену, проектная норма)	2	[20–23]
Примечание. Все предельно допустимые концентрации (ПДК) указаны для воздуха рабочей зоны (среднесменные) согласно ГН 2.2.5.3532–18 «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны». Для биоцидов (изотиазолины, триазины) единые российские ПДК в воздухе отсутствуют. Указаны ориентировочные значения по зарубежным источникам (Environmental Protection Agency – EPA, European Chemicals Agency – ECHA, Registry of Toxic Effects of Chemical Substance – RTECS, National Institute for Occupational Safety and Health – NIOSH) или классы опасности для водной среды: 1 – чрезвычайно опасно (свинец, изоцианаты, продукты пиролиза фторопласта); 2 – высоко опасно (стирол, эпоксидные смолы, кадмий, медь); 3 – умеренно опасно (ксилол, бутилацетат, церий); 4 – мало опасно (уайт-спирит, тальк, диоксид титана). В патентах часто намеренно скрыты точные названия компонентов, поэтому для них определены опасные компоненты по типу вещества (например, противогрибковый агент – тиабендазол или карбендазим с ПДК 0,1–0,5 мг/м ³). * Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. Л: Химия, 1976. 1824 с.					

Токсикологическая характеристика соединений, входящих в состав лакокрасочных материалов

В табл. 2 приведены некоторые токсичные соединения, содержащиеся в лакокрасочных материалах.

Таблица 2

Токсикологическая характеристика соединений в составе лакокрасочных материалов [24]

Состав	ЛПВ	ПДК, мг/см ³
ПАВ Неонол 1020-3, оксигетилированные вторичные спирты	Токс.	0,0001
ПАВ ОП-7, полиэтиленгликолевые эфиры моно- и диалкилфенолов		0,3
ПАВ ОП-10, смесь моно- и диалкилфеноловых эфиров полиэтиленгликоля		0,1
Цинк		0,01
Цирконий	Сан.	0,07
Свинец	Токс.	0,006
Железо		0,1
Ванадий		0,001
Марганец двухвалентный	Сан.-токс.	0,01

Примечание. ПАВ – поверхностно-активное вещество; ЛПВ – лимитирующий показатель вредности; ПДК – предельно допустимая концентрация; токс. – токсичный, характеризующий прямое токсическое воздействие на гидробионты; сан. – санитарный, отражающий нарушение экологических условий в водных объектах, включая изменение трофического статуса, гидрохимических параметров (содержание кислорода, соединений азота и фосфора, величина pH); сан.-токс. – санитарно-токсикологический (действие вещества на водные биологические ресурсы и санитарные показатели водных объектов) [25].

Сиккативы (отвердители) применяются в качестве катализаторов полимеризации и представляют собой композиции органических солей металлов. С позиций химико-технологической классификации металлы, используемые в сиккативах, разделяют на две группы [26, 27]:

- основные (марганец, церий, стронций, кобальт, ванадий, железо);
- вспомогательные (алюминий, цирконий, барий, свинец, висмут).

Дополнительными компонентами выступают цинк, калий, кальций и литий. Вследствие синергетического эффекта практическое применение находят преимущественно комбинированные составы.

Синтетические полимеры [28], период полураспада которых в морской среде оценивается столетиями, подвергаются деградации с образованием микро- и наночастиц, характеризующихся большей биодоступностью для организмов всех трофических уровней [29]. Полимерные матрицы могут содержать химические добавки и адсорбированные загрязнители, включая соединения, нарушающие работу эндокринной системы, проявляющие токсичность при сверхнизких концентрациях. Это создает потенциальные угрозы для морских экосистем, биоразнообразия и продовольственной безопасности. Сохраняется актуальность проведения целенаправленных исследований воздействия пластиковых загрязнителей на морскую среду [30].

Отсутствие решительных превентивных мер приведет к усугублению экологического ущерба и увеличению экономических потерь даже в краткосрочной перспективе. Повышение объемов производства и потребления пластиков совместно с нерациональным использованием, неэффективной системой сбора отходов и недостаточной эффективностью их утилизации (особенно в развивающихся странах) обуславливают сложность достижения установленных целевых показателей по сокращению морского мусора. Решение данной проблемы требует фундаментального пересмотра подходов к обращению с полимерными материалами.

Рабочая группа Региональных центров Стокгольмской и Базельской конвенций разработала документ в качестве информационной основы для обсуждения на Конференции сторон в 2017 г. Утверждена компетенция региональных центров по работе с проблемой пластиковых отходов с обязательным регулярным представлением отчетов на последующих заседаниях [31].

Несмотря на необходимость дальнейших исследований, имеющегося научного задела достаточно для обоснования мер со стороны научного сообщества, промышленности, органов власти и гражданского общества, направленных на ограничение поступления пластиков и содержащихся в них токсичных химических веществ в морские экосистемы [32].

Стойкие органические загрязнители (СОЗ), содержащиеся в микропластике, могут представлять опасность для водных организмов. Модель, представленная в работе [33], учитывает снижение концентрации СОЗ за счет их сорбции пластиком («разбавление» СОЗ), усиление биоаккумуляции при употреблении пластика, содержащего СОЗ («носитель»), и ослабление биоаккумуляции при употреблении чистого пластика («очистка»). Модель настроена для червей *Arenicola marina* (морской пескожил) и сопоставлена с данными о биоаккумуляции этого вида, полученными в результате лабораторных биоанализов с использованием микрочастиц полистирола. В закрытых лабораторных системах преобладают механизмы «разбавление» и «очистка», что приводит к снижению биоаккумуляции. В открытых морских системах также прогнозируется снижение биоаккумуляции за счет механизма «очистки», который предотвращает накопление СОЗ. Однако с точки зрения оценки риска различия считаются незначительными.

Соединения с низким содержанием брома показали наиболее высокую усвояемость. При этом высоkobромированные соединения у гидробионтов не обнаружены, что может быть связано с сильной сорбцией пластиком или низкой усвояемостью рыбами из-за большого размера этих молекул или других факторов. Однако вопреки этой тенденции низkobромированное соединение БДЭ-99, по-видимому, не подвергается биоаккумуляции в рыбе, что может быть связано с выделением из микроволокон или с тем, что оно метаболизируется *in vivo*. В работе [34] представлены доказательства того, что при случайном проглатывании средств личной гигиены, микрочастицы содержащиеся в их составе, способны переносить СОЗ в организм рыб.

В работе [35] оценивается потенциал вымывания нонилфенола (NP) и бисфенола А (BPA) из желудочно-кишечного тракта *Arenicola marina* (морской пескожил) и *Gadus morhua* (атлантическая треска). Неопределенность наиболее важных параметров объясняется вероятностным моделированием. Анализ показывает, что при употреблении пластика в пищу червем концентрации NP и BPA не превышают нижнюю границу допустимых диапазонов, и, следовательно, они вряд ли могут представлять собой значимый путь воздействия. Употребление пластика треской, по-видимому, является незначительным фактором воздействия NP и BPA.

Исследованы неравновесные сценарии, характерные для добавок, вымывающихся и сорбирующих гидрофобные органические соединения (ГОС). Количественно представлено, как процессы вымывания и сорбции усиливаются и ослабевают. Наблюдаемые закономерности были нечувствительны к изменениям в структуре пищевой цепи. Модель можно использовать в качестве инструмента для оценки возможных рисков воздействия микропластика и сложных специальных смесей на любую пищевую цепь, включая относящиеся к здоровью человека [36].

Кинетика переноса 14 полихлорированных дифенилов (ПХД) измерена в системах, имитирующих кишечник. С помощью модели в трех экологически значимых сценариях оценено воздействие на организм полиэтилена низкой плотности и поливинилхлорида. Продемонстрировано, что химический перенос является двухфазным и полностью обратимым: быстрый обмен происходит в течение нескольких часов, за ним следует медленный перенос, длящийся от нескольких недель до нескольких месяцев. В чистых кишечных системах биодоступность ПХД, связанных с пластиком, для

червей и трески составляла 14–42 и 45–83 % соответственно [37]. Однако в загрязненных кишечных системах чистый микропластик способен быстро извлекаться («очистка»). Возможность попадания ПХД из пищи в кишечник свидетельствует о том, что воздействие микропластика зависит от его источника. Таким образом, химическое загрязнение и «очистка», скорее всего, будут происходить одновременно из-за попадания микропластика в организм [38].

Однако спрогнозировано, что коэффициент биоаккумуляции в устойчивом состоянии будет снижаться с увеличением потребления микропластика гидробионтами, что свидетельствует об эффекте «разбавления». Результаты показывают, что ГОС, которые находятся в фазовом равновесии между микропластиком и окружающей средой, вряд ли будут накапливаться в дальнейшем при попадании в организм. Это справедливо даже для случаев, когда попадание микропластика в организм вносит значительный вклад в общее поглощение ГОС. Поэтому будущие исследования должны быть сосредоточены на ГОС, которые могут присутствовать в микропластиках в концентрации, превышающей их равновесную концентрацию в водном растворе [39].

Таким образом, эти результаты подтверждают вывод о том, что в большинстве случаев попадание органических загрязнителей в гидробионты вместе с микропластиком, вероятно, является незначительным фактором по сравнению с другими естественными путями воздействия.

В работе [40] изучены функции микропластика как переносчика загрязняющих веществ для морских организмов с помощью моделирования, лабораторных экспериментов и полевых исследований. Рассмотрена взаимосвязь между концентрациями химических загрязнителей и микропластика в организме рыб-фонариков (семейство *Myctophidae*), обитающих в северной части Тихого океана и за ее пределами. Сравнили концентрации нескольких химических соединений (БРА, 4-NP, октилфенол (4n-OP), этоксилаты алкилфенола (APE), пестициды, ПХД и полибромированные дифениловые эфиры (ПБДЭ)) в рыбе для оценки их взаимосвязи с содержанием пластика в каждом месте отбора проб. Средние концентрации БРА, 4-NP, 4n-OP, APE и общее количество ПБДЭ у миктофид, собранных в пределах и за пределами Северо-Тихоокеанского водоворота, сопоставимы. Содержание пестицидов было выше в организме рыбы, пойманной вне этого района, что связано с более низкой концентрацией пластика. Общее содержание ПХД также было выше в рыбе, пойманной вне этого района. Напротив, концентрация ПХД с более низким содержанием хлора была выше у рыб, обитающих в зоне накопления пластика, и коррелировала с более высокой концентрацией пластика. Этот вывод согласуется с результатами других исследований, демонстрирующих связь между ПХД с низким содержанием хлора и пластмассами в биоте, и позволяет предположить, что микропластик может переносить некоторые химические вещества в природе.

При проектировании изделий из полимерных материалов [41] необходимо учитывать их срок службы и возможность эффективной переработки после эксплуатации, что позволит добиться значительного синергетического эффекта, поскольку утилизация отходов путем вторичной переработки сократит использование невозобновляемых углеводородов, применяемых при производстве новых пластмасс, и в то же время уменьшит накопление отходов в процессе производства.

В исследовании [42] микропластик, содержащий ПХД, скормлен собранным в полевых условиях норвежским омарам (*Nephrops norvegicus*) во время лабораторных экспериментов *in vivo*. В каждом эксперименте использовали пластиковые микросферы из полиэтилена и полистирола диаметром 500–600 или 6 мкм с нанесением и без нанесения смеси из десяти видов ПХД. Наличие химических веществ на проглоченных микросферах не приводило к увеличению их биоаккумуляции. Наблюдали ограниченную

аккумуляцию ПХД в тканях хвоста *Nephrops norvegicus* после поглощения микросфер из полиэтилена, содержащих ПХД, в то время как у животных, которым скармливали микросферы из полистирола, ПХД практически не обнаружены. Употребление в пищу пластиковых сфер в течение 3 недель не повлияло на пищевой статус *Nephrops norvegicus*.

Недостаточно также свидетельств того, что микропластик является важным средством передачи СОЗ животным, но, возможно, это касается антипиренов [43] и других специализированных добавок [44–48].

Некоторые биоциды обладают способностью поддерживать присутствие транспозонов, которые несут гены, участвующие в перекрестной резистентности к биоцидам и антибиотикам. Распространение этих мобильных элементов, их генетическая организация и образование биопленок создают условия, в которых могут возникать потенциальные риски развития перекрестной устойчивости к антибиотикам и биоцидам [18].

Следовательно, важно знать риски, связанные с присутствием этих биоцидов в морской среде. Кроме того, важно оценить воздействие биоцидов с помощью непрерывного мониторинга их концентраций в воде, донных отложениях и биоте с целью получения информации, которая могла бы привести к согласованным действиям по запрету или регулированию их использования [49, 50].

Заключения

Современные тенденции в области разработки ЛКП направлены на создание материалов с пониженным содержанием токсичных компонентов и использованием альтернативных технологий защиты от обрастания. Однако даже перспективные составы могут содержать компоненты с недостаточно изученным токсикологическим профилем. Эффективное управление рисками, связанными с микрочастицами ЛКП, требует комплексного подхода, включающего совершенствование нормативной базы, разработку и внедрение безопасных материалов, а также оптимизацию процессов нанесения и удаления покрытий.

Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на оценке совокупного воздействия сложных смесей химических веществ, высвобождающихся из ЛКП, разработке стандартизированных методов тестирования и создании экономических стимулов для перехода на экологически безопасные технологии в лакокрасочной промышленности.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-528 от 24.04.2024 на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития).

Список источников

1. Occupational Exposures in Paint Manufacture and Painting // IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. 1989. Vol. 47. P. 324.
2. Lead poisoning cases associated with environmental sources // Chemical Hazards and Poisons Report. Health Protection Agency, 2008. P. 112–134.
3. Dorne J.L., Kass G.E.N., Bordajandi L.R. et al. Human risk assessment of heavy metals: principles and applications // Metal Ions in Life Sciences. 2011. Vol. 8. P. 35–57.
4. Silicone low friction-antifouling adhesive film for ships and manufacturing method thereof: pat. KR20230086093A; appl. 08.12.21; publ. 15.06.23.
5. Recoating organosilicon acrylic finish paint with excellent weather resistance for ships: pat. CN101921537A (B); appl. 06.08.10; publ. 22.12.10.

6. Environment-friendly water-based paint for ships: pat. CN111100488A; appl. 28.10.18; publ. 05.05.20.
7. Alkyd paint for ships and preparation method: pat. CN101875811A (B); appl. 06.07.10; publ. 03.11.10.
8. Bellas J. Comparative toxicity of alternative antifouling biocides to embryos and larvae of marine invertebrates // *Science of the Total Environment*. 2006. Vol. 367. No. 2–3. P. 573–585. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.01.028.
9. Antifouling paint for ships, as well as preparation method and application of antifouling paint: pat. CN107880603A; appl. 30.11.17; publ. 06.04.18.
10. Long-acting waterborne ship interior paint and preparing method thereof: pat. CN109627936A (B); appl. 17.12.18; publ. 16.04.19.
11. Antifouling paint for ships: pat. CN105778583A (B); appl. 21.03.16; publ. 20.07.16.
12. Kennedy A.J., Hull M.S., Bednar A.J. et al. Fractioning nanosilver: importance for determining toxicity to aquatic test organisms // *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44. No. 24. P. 9571–9577. DOI: 10.1021/es1025382.
13. Antifouling coating used for ships: pat. CN104342014A (B); appl. 23.10.14; publ. 11.02.15.
14. Antifouling paint for ships and preparation method thereof: pat. CN116396684A (B); appl. 29.03.23; publ. 07.07.23.
15. Over-rust corrosion protective coating for ships: pat. CN111100508A; appl. 28.10.18; publ. 05.05.20.
16. Water-based anticorrosive paint for ships and preparation method of water-based anticorrosive paint: pat. CN116875139A (B); appl. 25.07.23; publ. 13.10.23.
17. Antifouling coating for ship: pat. JP2014208823A (B2); appl. 16.07.07; publ. 06.11.14.
18. Acid-resistant paint for ships: pat. CN114133832A; appl. 30.12.21; publ. 04.03.22.
19. Epoxy acrylic joint paint for ships and preparation method of epoxy acrylic joint paint: pat. CN108034329A (B); appl. 30.11.17; publ. 15.05.18.
20. Чубенко Е.Б., Баглов А.В., Дудчик Н.В. и др. Оценка интегральной токсичности фотокатализаторов на основе графитоподобного нитрида углерода в люминесцентном тесте // *Кинетика и катализ*. 2022. Т. 63. № 2. С. 187–192. DOI: 10.31857/S0453881122020010.
21. Ye N., Wang Z., Wang S., Peijnenburg W.J. Toxicity of mixtures of zinc oxide and graphene oxide nanoparticles to aquatic organisms of different trophic level: particles outperform dissolved ions // *Nanotoxicology*. 2018. Vol. 12. No. 5. P. 423–438. DOI: 10.1080/17435390.2018.1458342.
22. Bayouth J.E., Macey D.J., Kasi L.P., Fossella F.V. Dosimetry and toxicity of samarium-153-EDTMP administered for bone pain due to skeletal metastases // *Journal of Nuclear Medicine*. 1994. Vol. 35. No. 1. P. 63–69.
23. Anticorrosive paint applied to ships and preparation method of anticorrosive paint: pat. CN114032003A (B); appl. 02.11.21; publ. 11.02.22.
24. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 № 552. URL: https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minselkhoza_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhdenii_pdk.pdf (дата обращения: 27.11.2025).
25. Halpern B.S., Walbridge S., Selkoe K.A. et al. A global map of human impact on marine ecosystems // *Science*. 2008. Vol. 319. No. 5865. P. 948–952. DOI: 10.1126/science.1149345.
26. Gallo F., Fossi C., Weber R. et al. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures // *Environmental Sciences Europe*. 2018. Vol. 30. P. 13. DOI: 10.1186/s12302-018-0139-z.
27. Bart J.C.J. Additives in Polymers: Industrial Analysis and Applications. Chichester: John Wiley & Sons, 2005. 594 p.
28. Gallo F., Fossi C., Weber R. et al. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures // *Environmental Sciences Europe*. 2018. Vol. 30. Art. 30.

29. Weldon D.G. Failure Analysis of Paints and Coatings. Rev. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. 362 p.
30. Wagner F., Rossi V., Aubry-Kientz M. et al. Pan-Tropical Analysis of Climate Effects on Seasonal Tree Growth // PLOS ONE. 2014. Vol. 9. P. e92337. DOI: 10.1371/journal.pone.0092337.
31. Koelmans A.A., Bakir A., Burton G.A., Janssen C.R. Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50. No. 7. P. 3315–3326. DOI: 10.1021/acs.est.5b06069.
32. Matishov G.G., Laptev A.B., Akhiyarov R.Zh. et al. Method of accounting for the accelerated destruction of coupon edges when determining the effectiveness of corrosion inhibitors // Corrosion Reviews. 2025. Vol. 44 (1). P. 20240143. DOI: 10.1515/correv-2024-0143.
33. Besseling E., Foekema E.M., van den Heuvel-Greve M.J., Koelmans A.A. The Effect of Microplastic on the Uptake of Chemicals by the Lugworm *Arenicola marina* (L.) under Environmentally Relevant Exposure Conditions // Environmental Science & Technology. 2017. Vol. 51. No. 15. P. 8795–8804. DOI: 10.1021/acs.est.7b02286.
34. Wardrop P., Shimeta J., Nuggeoda D. et al. Chemical Pollutants Sorbed to Ingested Microbeads from Personal Care Products Accumulate in Fish // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50. No. 7. P. 4037–4044. DOI: 10.1021/acs.est.5b06280.
35. Koelmans A.A., Besseling E., Foekema E.M. Leaching of plastic additives to marine organisms // Environmental Pollution. 2014. Vol. 187. P. 49–54. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.12.013.
36. Diepens N.J., Koelmans A.A. Accumulation of Plastic Debris and Associated Contaminants in Aquatic Food Webs // Environmental Science & Technology. 2018. Vol. 52. No. 15. P. 8510–8520. DOI: 10.1021/acs.est.8b02515.
37. Hazimah N., Koelmans A.A. Transfer of PCBs from Microplastics under Simulated Gut Fluid Conditions Is Biphasic and Reversible // Environmental Science & Technology. 2019. Vol. 53. No. 4. P. 1871–1879. DOI: 10.1021/acs.est.8b05143.
38. Lee H., Lee H.J., Kwon J.H. Estimating microplastic-bound intake of hydrophobic organic chemicals by fish using measured desorption rates to artificial gut fluid // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 642. P. 505–513. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.075.
39. Beckingham B., Ghosh U. Differential bioavailability of polychlorinated biphenyls associated with environmental particles: Microplastic in comparison to wood, coal and biochar // Environmental Pollution. 2016. Vol. 220. P. 150–158. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.09.033.
40. Gassel M., Rochman C.M. The complex issue of chemicals and microplastic pollution: A case study in North Pacific lanternfish // Environmental Pollution. 2019. Vol. 248. P. 1000–1009. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.02.067.
41. Thompson R.C. Microplastics in the Marine Environment: Sources, Consequences and Solutions // Marine Anthropogenic Litter. Springer Open, 2015. P. 185–200.
42. Devriese L.I., De Witte B., Vethaak A.D., Leslie H.A. Bioaccumulation of PCBs from microplastics in Norway lobster (*Nephrops norvegicus*): An experimental study // Chemosphere. 2017. Vol. 186. P. 10–16. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.121.
43. Lohmann R. Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans – but should microplastics be considered POPs themselves? // Integrated Environmental Assessment and Management. 2017. Vol. 13. No. 3. P. 460–465. DOI: 10.1002/ieam.1914.
44. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E. et al. A Study of the Structure and Properties of Polymer Composite Materials with Integrated Vibration Absorbing Layer // Polymer Science, Series D. 2020. Vol. 13. No. 3. P. 335–340. DOI: 10.1134/S1995421220030090.
45. Лаптев А.Б., Матишов Г.Г., Кривушина А.А., Павлов М.Р., Николаев Е.В. Влияние перехода температуры воздуха через нулевое значение на поверхностную целостность полимерного материала. Часть 1. Увлажнение // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). С. 147–156. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-147-156.
46. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 70–80. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 27.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.

47. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). С. 32–51. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
48. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). С. 114–122. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
49. Bejarano A.C., Chandler G.T., Decho A.W. Influence of natural dissolved organic matter (DOM) on acute and chronic toxicity of the pesticides chlorothalonil, chlorpyrifos and fipronil on the meiobenthic estuarine copepod *Amphiascus tenuiremis* // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2005. Vol. 321. No. 1. P. 43–57. DOI: 10.1016/j.jembe.2005.01.005.
50. ASTM E1688-19. Standard Guide for Determination of the Bioaccumulation of Sediment-Associated Contaminants by Benthic Invertebrates. West Conshohocken: ASTM International, 2019. 54 p.

References

1. Occupational Exposures in Paint Manufacture and Painting. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 1989, vol. 47, p. 324.
2. Lead poisoning cases associated with environmental sources. *Chemical Hazards and Poisons Report*. Health Protection Agency, 2008, pp. 112–134.
3. Dorne J.L., Kass G.E.N., Bordajandi L.R. et al. Human risk assessment of heavy metals: principles and applications. *Metal Ions in Life Sciences*, 2011, vol. 8, pp. 35–57.
4. *Silicone low friction-antifouling adhesive film for ships and manufacturing method thereof*: pat. KR20230086093A; appl. 08.12.21; publ. 15.06.23.
5. *Recoating organosilicon acrylic finish paint with excellent weather resistance for ships*: pat. CN101921537A (B); appl. 06.08.10; publ. 22.12.10.
6. *Environment-friendly water-based paint for ships*: pat. CN111100488A; appl. 28.10.18; publ. 05.05.20.
7. *Alkyd paint for ships and preparation method*: pat. CN101875811A (B); appl. 06.07.10; publ. 03.11.10.
8. Bellas J. Comparative toxicity of alternative antifouling biocides to embryos and larvae of marine invertebrates. *Science of the Total Environment*, 2006, vol. 367, no. 2–3, pp. 573–585. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.01.028.
9. *Antifouling paint for ships, as well as preparation method and application of antifouling paint*: pat. CN107880603A; appl. 30.11.17; publ. 06.04.18.
10. *Long-acting waterborne ship interior paint and preparing method thereof*: pat. CN109627936A (B); appl. 17.12.18; publ. 16.04.19.
11. *Antifouling paint for ships*: pat. CN105778583A (B); appl. 21.03.16; publ. 20.07.16.
12. Kennedy A.J., Hull M.S., Bednar A.J. et al. Fractioning nanosilver: importance for determining toxicity to aquatic test organisms. *Environmental Science & Technology*, 2010, vol. 44, no. 24, pp. 9571–9577. DOI: 10.1021/es1025382.
13. *Antifouling coating used for ships*: pat. CN104342014A (B); appl. 23.10.14; publ. 11.02.15.
14. *Antifouling paint for ships and preparation method thereof*: pat. CN116396684A (B); appl. 29.03.23; publ. 07.07.23.
15. *Over-rust corrosion protective coating for ships*: pat. CN111100508A; appl. 28.10.18; publ. 05.05.20.
16. *Water-based anticorrosive paint for ships and preparation method of water-based anticorrosive paint*: pat. CN116875139A (B); appl. 25.07.23; publ. 13.10.23.
17. *Antifouling coating for ship*: pat. JP2014208823A (B2); appl. 16.07.07; publ. 06.11.14.
18. *Acid-resistant paint for ships*: pat. CN114133832A; appl. 30.12.21; publ. 04.03.22.
19. *Epoxy acrylic joint paint for ships and preparation method of epoxy acrylic joint paint*: pat. CN108034329A (B); appl. 30.11.17; publ. 15.05.18.
20. Chubenko E.B., Baglov A.V., Dudchik N.V. et al. Evaluation of the integral toxicity of photocatalysts based on graphite-like carbon nitride in a luminescent test. *Kinetika i kataliz*, 2022, vol. 63, no. 2, pp. 187–192. DOI: 10.31857/S0453881122020010.

21. Ye N., Wang Z., Wang S., Peijnenburg W.J. Toxicity of mixtures of zinc oxide and graphene oxide nanoparticles to aquatic organisms of different trophic level: particles outperform dissolved ions. *Nanotoxicology*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 423–438. DOI: 10.1080/17435390.2018.1458342.
22. Bayouth J.E., Macey D.J., Kasi L.P., Fossella F.V. Dosimetry and toxicity of samarium-153-EDTMP administered for bone pain due to skeletal metastases. *Journal of Nuclear Medicine*, 1994, vol. 35, no. 1, pp. 63–69.
23. *Anticorrosive paint applied to ships and preparation method of anticorrosive paint*: pat. CN114032003A (B); appl. 02.11.21; publ. 11.02.22.
24. *On approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance*: Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated 13.12.2016 No. 552. Available at: https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minselkhoza_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhenii_pdk.pdf (accessed: November 27, 2025).
25. Halpern B.S., Walbridge S., Selkoe K.A. et al. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 2008, vol. 319, no. 5865, pp. 948–952. DOI: 10.1126/science.1149345.
26. Gallo F., Fossi C., Weber R. et al. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. *Environmental Sciences Europe*, 2018, vol. 30, p. 13. DOI: 10.1186/s12302-018-0139-z.
27. Bart J.C.J. *Additives in Polymers: Industrial Analysis and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2005, 594 p.
28. Gallo F., Fossi C., Weber R. et al. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. *Environmental Sciences Europe*, 2018, vol. 30, art. 30.
29. Weldon D.G. *Failure Analysis of Paints and Coatings*. Rev. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2009, 362 p.
30. Wagner F., Rossi V., Aubry-Kientz M. et al. Pan-Tropical Analysis of Climate Effects on Seasonal Tree Growth. *PLOS ONE*, 2014, vol. 9, p. e92337. DOI: 10.1371/journal.pone.0092337.
31. Koelmans A.A., Bakir A., Burton G.A., Janssen C.R. Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environmental Science & Technology*, 2016, vol. 50, no. 7, pp. 3315–3326. DOI: 10.1021/acs.est.5b06069.
32. Matishov G.G., Laptev A.B., Akhiyarov R.Zh. et al. Method of accounting for the accelerated destruction of coupon edges when determining the effectiveness of corrosion inhibitors. *Corrosion Reviews*, 2025, vol. 44 (1), p. 20240143. DOI: 10.1515/correv-2024-0143.
33. Besseling E., Foekema E.M., van den Heuvel-Greve M.J., Koelmans A.A. The Effect of Microplastic on the Uptake of Chemicals by the Lugworm *Arenicola marina* (L.) under Environmentally Relevant Exposure Conditions. *Environmental Science & Technology*, 2017, vol. 51, no. 15, pp. 8795–8804. DOI: 10.1021/acs.est.7b02286.
34. Wardrop P., Shimeta J., Nuggeoda D. et al. Chemical Pollutants Sorbed to Ingested Microbeads from Personal Care Products Accumulate in Fish. *Environmental Science & Technology*, 2016, vol. 50, no. 7, pp. 4037–4044. DOI: 10.1021/acs.est.5b06280.
35. Koelmans A.A., Besseling E., Foekema E.M. Leaching of plastic additives to marine organisms. *Environmental Pollution*, 2014, vol. 187, pp. 49–54. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.12.013.
36. Diepens N.J., Koelmans A.A. Accumulation of Plastic Debris and Associated Contaminants in Aquatic Food Webs. *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, no. 15, pp. 8510–8520. DOI: 10.1021/acs.est.8b02515.
37. Hazimah N., Koelmans A.A. Transfer of PCBs from Microplastics under Simulated Gut Fluid Conditions Is Biphasic and Reversible. *Environmental Science & Technology*, 2019, vol. 53, no. 4, pp. 1871–1879. DOI: 10.1021/acs.est.8b05143.
38. Lee H., Lee H.J., Kwon J.H. Estimating microplastic-bound intake of hydrophobic organic chemicals by fish using measured desorption rates to artificial gut fluid. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 642, pp. 505–513. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.075.
39. Beckingham B., Ghosh U. Differential bioavailability of polychlorinated biphenyls associated with environmental particles: Microplastic in comparison to wood, coal and biochar. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 220, pp. 150–158. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.09.033.

40. Gassel M., Rochman C.M. The complex issue of chemicals and microplastic pollution: A case study in North Pacific lanternfish. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 248, pp. 1000–1009. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.02.067.
41. Thompson R.C. Microplastics in the Marine Environment: Sources, Consequences and Solutions. *Marine Anthropogenic Litter*. Springer Open, 2015, pp. 185–200.
42. Devriese L.I., De Witte B., Vethaak A.D., Leslie H.A. Bioaccumulation of PCBs from microplastics in Norway lobster (*Nephrops norvegicus*): An experimental study. *Chemosphere*, 2017, vol. 186, pp. 10–16. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.121.
43. Lohmann R. Microplastics are not important for the cycling and bioaccumulation of organic pollutants in the oceans – but should microplastics be considered POPs themselves? *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 460–465. DOI: 10.1002/ieam.1914.
44. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E. et al. A Study of the Structure and Properties of Polymer Composite Materials with Integrated Vibration Absorbing Layer. *Polymer Science, Series D*, 2020, vol. 13, no. 3, pp. 335–340. DOI: 10.1134/S1995421220030090.
45. Laptev A.B., Matishov G.G., Krivushina A.A., Pavlov M.R., Nikolaev E.V. The effect of the transition of air temperature through zero on the surface integrity of a polymer material. Part 1. Moistening. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), pp. 147–156. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-147-156.
46. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 70–80. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 27, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
47. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), pp. 32–51. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
48. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1. Testing of new materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), pp. 114–122. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
49. Bejarano A.C., Chandler G.T., Decho A.W. Influence of natural dissolved organic matter (DOM) on acute and chronic toxicity of the pesticides chlorothalonil, chlorpyrifos and fipronil on the meiobenthic estuarine copepod *Amphiascus tenuiremis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, vol. 321, no. 1, pp. 43–57. DOI: 10.1016/j.jembe.2005.01.005.
50. ASTM E1688-19. *Standard Guide for Determination of the Bioaccumulation of Sediment-Associated Contaminants by Benthic Invertebrates*. West Conshohocken: ASTM International, 2019, 54 p.

Информация об авторах

Лаптев Анатолий Борисович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Матишов Геннадий Григорьевич, научный руководитель, академик РАН, ЮНЦ РАН ssc-ras@ssc-ras.ru

Булышева Наталья Ивановна, заведующая лабораторией, к.б.н., ЮНЦ РАН, ssc-ras@ssc-ras.ru

Кривушина Анастасия Александровна, старший научный сотрудник, к.б.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anatoly B. Laptev, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Gennady G. Matishov, Scientific Adviser, Academician of the RAS, SSC of the RAS, ssc-ras@ssc-ras.ru

Natalia I. Bulysheva, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Bio.), SSC of the RAS, ssc-ras@ssc-ras.ru

Anastasia A. Krivushina, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 11.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.12.2025.

The article was submitted 11.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 26.12.2025.