

Научная статья

УДК 629.7.023.222:632.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-133-144

ТОКСИЧНОСТЬ МИКРОЧАСТИЦ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ Часть 1. Источники, состав и пути миграции в окружающей среде

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.ru

²Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия; ssc-ras@ssc-ras.ru

Аннотация. Представлены исторические аспекты и результаты комплексного анализа проблемы загрязнения морской среды микрочастицами пластика из лакокрасочных покрытий. Детально описаны источники поступления и химический состав микрочастиц покрытий, включая тяжелые металлы, стойкие органические загрязнители и соединения, вызывающие эндокринные нарушения. Проанализированы основные пути образования микрочастиц на всех этапах жизненного цикла покрытий: производство, нанесение, эксплуатация и утилизация. Особое внимание уделено механизмам накопления микрочастиц в прибрежных экосистемах и их воздействию на морские организмы через трофические цепи.

Ключевые слова: 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 1. Источники, состав и пути миграции в окружающей среде // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 133–144. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-133-144.

Scientific article

TOXICITY OF MICROPARTICLES OF PAINT COATINGS Part 1. Sources, composition and ways of migration in the environment

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.ru

²Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia; ssc-ras@ssc-ras.ru

Abstract. The article provides a comprehensive analysis of the problem and historical aspects of marine environmental pollution by plastic microparticles from paint coatings. The sources of intake and the chemical composition of microparticles paintwork are described in detail, including heavy metals, persistent organic pollutants and endocrine disruptors. The main ways of microparticle emission at all stages of the coating life cycle are analyzed: production, application, operation and disposal. Special attention is paid to the mechanisms of accumulation of microparticles in coastal ecosystems and their effects on marine organisms through trophic chains.

Keywords: 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 micro-particles of paint coatings. Part 1. Sources, composition and ways of migration in the environment. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 133–144. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-133-144.

Введение

В научных публикациях загрязнение морской среды мусором впервые признано потенциально серьезной экологической проблемой в 1970-х гг. [1]. Научное сообщество заявило о появлении искусственных объектов, плавающих на морской поверхности [2–5], а также скапливающихся на морском дне [6, 7] и береговой линии [8, 9].

В соответствии с современной экологической таксономией, любой синтезированный или полученный в результате вторичной переработки материал, обладающий повышенной резистентностью к химико-биологической деградации в условиях водной среды, подлежит классификации в качестве антропогенного загрязнителя техногенного происхождения [10]. К указанной категории относятся объекты и изделия, выведенные из эксплуатационного цикла, утилизированные ненадлежащим образом либо представляющие собой заброшенные конструкции, локализованные в прибрежных и морских экосистемах [11]. Существенный вклад в увеличение объема скапливающегося морского мусора антропогенной природы вносят экстремальные гидрометеорологические и геофизические явления (цунами, паводки, циклоны), способствующие его перемещению с береговой линии и прилегающих территорий в акватории Мирового океана, инициируя процесс дальнейшего распространения загрязнителей [12, 13]. Попадая в морскую среду, данные объекты оказывают негативное воздействие на биоту через различные механизмы влияния [14].

Более двух тысячелетий на океанические экосистемы оказывалась антропогенная нагрузка, связанная с захоронением отходов, что исторически обосновывалось концепцией неограниченного ассимиляционного потенциала океана. Подобная практика не вызывала значительных экологических последствий при низкой плотности населения прибрежных зон и доминировании биodeградируемых материалов в структуре отходов [15, 16]. Однако экспоненциальное повышение демографических показателей в комбинации с экономической и потребительской экспансией со второй половины XX в. коррелирует с критическим увеличением загрязнения морских акваторий [17–21]. В настоящее время ~50 % мирового населения концентрируется в 150-километровой прибрежной зоне [22]. Указанные факторы обуславливают увеличение объемов генерации отходов, в том числе материалов с крайне низкой скоростью биodeградации (полимерные композиции), что приводит к их аккумуляции в океанических экосистемах [23].

Характеристики частиц микропластика в океанической среде

Синтетические полимеры с периодом полураспада в морских условиях, исчисляемым столетиями, подвергаются фрагментации с образованием микро- и наночастиц, что повышает их биодоступность для гидробионтов [24]. В состав современных полимерных композиционных матриц, являющихся основой широкого спектра изделий, включают ряд технологических добавок (пластификаторы, стабилизаторы, антипирены), а в процессе модификации и эксплуатации они абсорбируют из окружающей среды посторонние химические контаминанты. Особую экологическую опасность представляют вещества, нарушающие работу эндокринной системы (Endocrine Disrupting Chemicals). Данные соединения демонстрируют выраженные негативные эффекты в отношении гидробионтов даже при ультранизких концентрациях в водной среде, формируя тем самым долгосрочные кумулятивные риски для устойчивости морских

экосистем, сохранения биоразнообразия и продовольственной безопасности, связанной с биоресурсами океана. В связи с этим в последнее время инициировано и реализовано множество научных изысканий, целью которых являются систематизация данных, ликвидация существующих пробелов в знаниях и построение количественных моделей, описывающих механизмы и масштабы воздействия пластиковых загрязнителей и их дериватов на морскую биоту и абиотические компоненты окружающей среды [25].

Антропогенное воздействие на океанические системы не ограничивается загрязнением [26, 27], а включает комплекс физико-химических процессов:

- механические преобразования береговой линии и донных структур;
- персистентное химическое и биологическое загрязнение, источником которого служат сточные воды промышленного, городского и сельскохозяйственного происхождения;
- кумулятивные последствия технологических операций, таких как дноуглубительные работы, опреснение, интенсивное судоходство и добыча полезных ископаемых на шельфе.

Указанные факторы, находясь в синергетическом взаимодействии с такими явлениями, как интродукция аллохтонных (инвазивных) биологических видов, хроническое акустическое загрязнение антропогенного генезиса и крупномасштабные климатические изменения (окисление водной среды, эвстатическое повышение уровня моря, изменение солёности, учащение экстремальных метеорологических событий), способны инициировать каскад необратимых реакций. К ним относятся структурно-функциональные перестройки пелагических и бентосных сообществ, деградация трофических связей, сокращение генетического разнообразия ключевых видов и, как следствие, критическое снижение устойчивости и резильентности сложноорганизованных океанических экосистем к внешним воздействиям [18, 28–35].

Гипотеза о роли микропластика, включая частицы, образующиеся при деградации лакокрасочных покрытий (ЛКП), как переносчика гидрофобных органических соединений (ГОС) в трофические цепи морских экосистем является ключевой парадигмой для оценки комплексной экологической опасности и количественной оценки рисков, связанных с загрязнением водной среды полимерными материалами [36]. Данная концептуальная модель получила широкое распространение в научном дискурсе, однако требует строгой экспериментальной и теоретической верификации.

В работе [36] приводится критический систематический анализ научно-технической литературы, посвященной проверке указанной гипотезы. Благодаря использованию оригинальных расчетных методов для обработки опубликованных эмпирических данных противоречивые результаты различных исследовательских групп систематизированы в унифицированную интерпретационную модель. Показано, что значительная часть расхождений в выводах обусловлена различиями в исходных постулатах и дизайне экспериментов, т. е. фактической проверкой неидентичных рабочих гипотез. При реинтерпретации накопленных экспериментальных данных с использованием единой концепции, соответствующей исходной гипотезе о сорбционно-десорбционном переносе ГОС, противоречивые результаты становятся логически согласованными и укладываются в целостную объяснительную модель. Распределение ГОС в системе «вода–пластик» подчиняется закономерностям сорбционного равновесия. Рассчитано, что доля ГОС, сорбируемых пластиком, существенно уступает доле соединений, сорбируемых другими средами в океане.

Загрязнение водных экосистем пластиковыми отходами вызывает обеспокоенность как с этико-эстетических позиций, так и в контексте потенциальных угроз для здоровья биоты и устойчивости экосистем (рис. 1). В научно-технической литературе

детально задокументированы механизмы прямого физического воздействия макропластика (фракция частиц размером >5 мм) на гидробионты, включая его заглатывание и запутывание в нем. Однако убедительных доказательств каскадного негативного воздействия макропластика на уровень популяций или целостных биоценозов в настоящее время недостаточно. Менее изученным остается вопрос о комплексном экотоксикологическом влиянии микропластика (фракция частиц размером <5 мм), что определяет его в качестве приоритетного объекта исследований.



Рис. 1. Взаимодействие микропластика с живыми организмами

Методологический аппарат изучения микропластика находится в стадии активного формирования. Ранние работы, посвященные оценкам его распространения и патогенеза воздействия, зачастую опирались на фрагментарные подходы. К таковым относятся, например, изолированная регистрация локально высоких концентраций без учета фоновых уровней или постановка экспериментов в условиях, неадекватно представляющих реальную среду (искусственно завышенные концентрации, нерепрезентативные виды тест-объектов). Несмотря на это, ряд современных публикаций предоставляет новые доказательства синергетических эффектов, что актуализирует задачу гармонизации методологий и максимальной аппроксимации экспериментальных условий к натурным. Ключевым требованием для получения надежных данных, необходимых для оценки рисков на популяционном и экосистемном уровнях, является учет двух фундаментальных аспектов: возрастного распределения микропластика в акватории и кинетики установления сорбционного равновесия с ГОС.

Основой для моделирования возрастного распределения микропластика в морских акваториях служат задокументированные данные о глобальном производстве полимеров, демонстрирующие экспоненциальное возрастание объемов с 1,7 млн т в 1950 г. до ~299 млн т в 2013 г. (рис. 2). Данные общемировой динамики производства пластика можно аппроксимировать полиномом второй степени, который отражает основной тренд, нивелируя незначительные колебания, связанные с периодами экономической стагнации (1970-е, 1980-е, 2007 гг.). В упрощенной модели предполагается, что

в Мировой океан ежегодно поступает относительно постоянная доля от общего объема произведенного пластика. Таким образом, отходы, выброшенные на ранних этапах производства, имеют «экологический возраст» ~60 лет, тогда как отходы 2014 г. – менее 1 года. Учет ежегодных объемов отходов и времени их пребывания в среде позволяет смоделировать кумулятивное возрастное распределение всего пластикового загрязнения в океане.

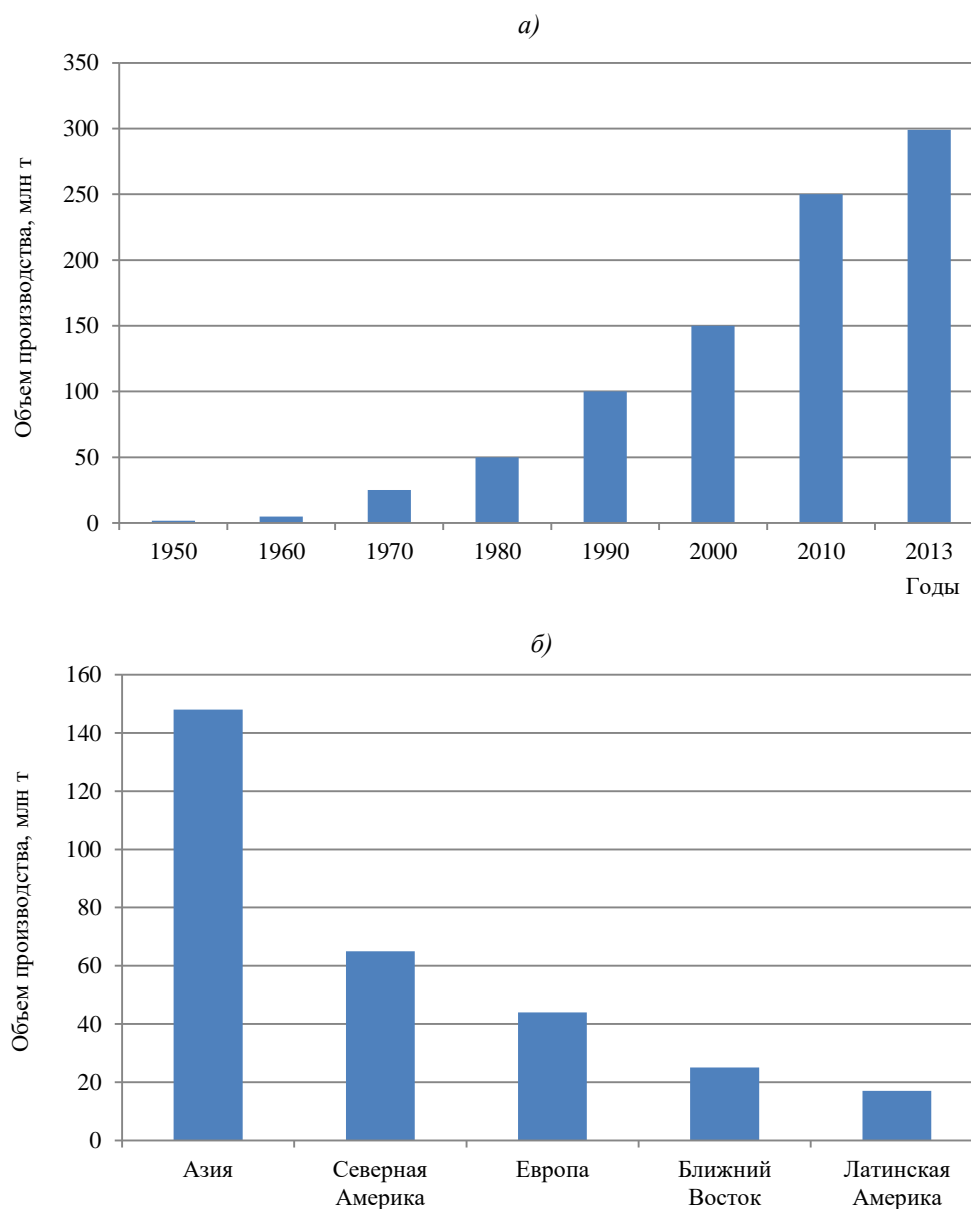


Рис. 2. Мировое (а) и региональное, по данным на 2013 г. (б), производство пластика

Согласно результатам моделирования для 2015 г., ~50 % всего пластика находилось в океане более 13 лет, в то время как возраст 80 и 90 % этого загрязнения превышает 4 и 2 года соответственно. Анализ динамики производства пластика в Европе дает схожее, но несколько смещенное распределение: 50 и 90 % пластика имеет возраст более 17 и 3 лет соответственно.

Механизмы десорбции ГОС из пластика являются общими для всех непереварируемых сорбентов и определяют чистое потребление микропластика. На рис. 3 показано

относительное распределение естественных и искусственных загрязнений Мирового океана, на долю которых приходится 95,8 и 4,2 % соответственно.

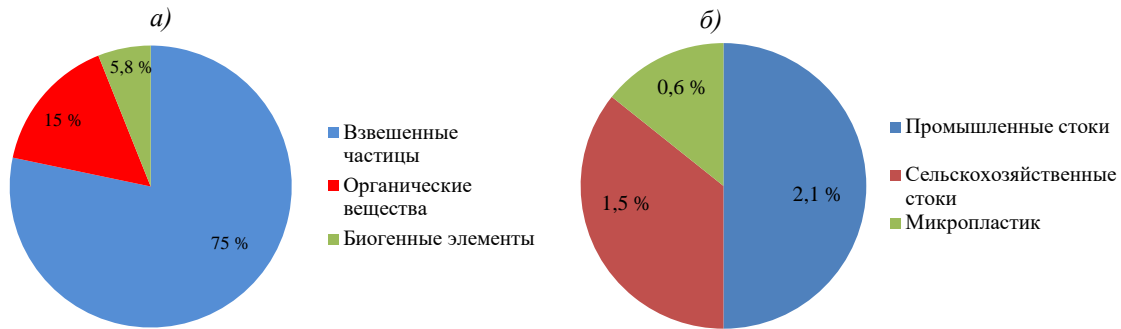


Рис. 3. Относительное распределение естественных (а) и искусственных (б) загрязнений в Мировом океане

Согласно данным рис. 3, количество микропластика как загрязняющего океаны вещества незначительно и составляет 0,6 %, при этом на долю частиц ЛКП приходится 0,000000000000001 % [36]. Тем не менее в прибрежных районах его концентрация может быть значительно выше. С этой точки зрения важно изучать не микропластики в целом, а микрочастицы ЛКП.

Поступление и накопление пластика в окружающей среде

Накопление микрочастиц пластика из морской воды организмами (рачки, моллюски, рыбы, млекопитающие и др.) [37–41] происходит несколькими способами:

- десорбция из пластика с последующим поглощением природными органическими частицами и дальнейшим проглатыванием в качестве добычи (косвенный источник), а также поглощение при проглатывании обычных (неполимерных) предметов [42];
- поглощение путем переноса через кожу или жабры [43, 44].

Механизм поглощения крупных частиц (обломков) может нуждаться в дальнейшем экспериментальном подтверждении. Однако в настоящее время этот процесс уже хорошо изучен для животных и человека [45]. Неперевариваемые невсасываемые липофильные полимерные фазы, такие как жидкий парафин [46, 47] или активированный уголь, ускоряют выведение загрязнителей и снижают нагрузку на организм.

Содержание пластика в Мировом океане составляет $\sim 10^{-14}$ % от его общего объема. Необходимо отметить, что океаны не представляют собой единый однородный бассейн. Кроме того, источники и виды пластмасс существенно не влияют на распределение микропластика по всему миру. Микропластик концентрируется ближе к источнику загрязнения – у берегов и вдоль течений, поэтому загрязняет береговую линию и пелагиаль водоемов – именно те зоны, в которых наиболее активно развиваются флора и фауна.

Пространственное распределение концентраций микропластика в морской среде характеризуется крайней неоднородностью и региональной вариабельностью. Данный параметр является функцией множества взаимосвязанных факторов, основными из которых выступают: локальный объем загрязняющих полимерных материалов (включая частицы ЛКП), гидродинамический режим акватории (наличие и скорость прибрежных течений, циркуляционные паттерны), а также климатические параметры (температура воды, скорость и режим ветра). Значительное количество факторов, определяющих динамику и трансформацию пластикового дебриса, требует количественной оценки.

В частности, важно исследовать процессы атмосферного и гидросферного старения полимерных матриц, особенно ЛКП. Необходимо установить кинетику и вклад таких параметров, как интенсивность ультрафиолетового излучения, циклические колебания температуры и влажности, в процессы фотоокислительной деструкции, охрупчивания и последующего отслоения покрытий с эксплуатируемых поверхностей (корпусов судов, гидротехнических сооружений) [48–50]. Ключевым является вопрос о степени устойчивости различных типов ЛКП к процессам выветривания и их способности к трансграничному переносу в форме микрочастиц. Основной задачей экотоксикологии является переход от констатации наличия микропластика в Мировом океане к оценке его биологического воздействия. Для этого требуется провести исследования, устанавливающие дозозависимый отклик и пороговые концентрации микрочастиц ЛКП на ключевые физиологические, репродуктивные функции и жизнеспособность гидробионтов на индивидуальном и популяционном уровнях.

Заключения

Микрочастицы ЛКП представляют собой источник загрязнения морской среды. Их опасность обусловлена не только самим фактом присутствия пластиковых частиц в экосистемах, но и их химическим составом, включающим токсичные добавки, тяжелые металлы и стойкие органические загрязнители. Пути поступления микрочастиц ЛКП в окружающую среду многообразны и охватывают весь жизненный цикл покрытий – от производства до утилизации. Особую опасность представляют операции по удалению покрытий, при которых образуются высокодисперсные частицы, легко попадающие в водные экосистемы.

Анализ возрастного распределения микропластика в океанах показывает, что значительная часть пластиковых отходов накапливается в морской среде десятилетиями, создавая долгосрочную угрозу для морских экосистем. Концентрация микрочастиц значительно варьирует в зависимости от региона, при этом наибольшие концентрации наблюдаются в прибрежных зонах с высокой биологической активностью.

Необходимость разработки комплексных мер по снижению объемов микрочастиц ЛКП в окружающей среде и оценки их воздействия на морские экосистемы очевидна и требует безотлагательных действий. Дальнейшие исследования необходимо направить на уточнение механизмов миграции и трансформации микрочастиц ЛКП в морской среде, оценку их потенциала к биоаккумуляции и разработку эффективных методов предотвращения их поступления в окружающую среду.

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. Marine debris pollution in the Pacific. Literature review // SPREP. URL: https://www.sprep.org/attachments/2014SM25/Noumea/12NC_WP.7.7_Annex_1_Literature_review_-_Marine_Debris_Pacific_-_Final.pdf (дата обращения: 27.11.2025).
2. Heyerdahl T. Atlantic Ocean pollution and biota observed by the Ra expeditions // Biological Conservation. 1971. Vol. 3. No. 2. P. 164–167.
3. Carpenter E.J., Anderson S.J., Harvey G.R. et al. Polystyrene spherules in coastal waters // Science. 1972. Vol. 173. P. 749–750.
4. Venrick E.L., Backman T.W., Bartram W.C. et al. Man-made objects on the surface of the Central North Pacific Ocean // Nature. 1973. Vol. 241. P. 271.

5. Colton Jr. J.B., Knapp F.D., Burns B.R. Plastic particles in surface waters of the Northwestern Atlantic // *Science*. 1974. Vol. 185. P. 491–497.
6. Holmstrom A. Plastic films on the bottom of the Skagerack // *Nature*. 1975. Vol. 255. P. 622–623.
7. Feder H.M., Jewett S.C., Hilsinger J.R. Man-made debris on the Bering Sea floor // *Marine Pollution Bulletin*. 1978. Vol. 9. No. 2. P. 52–53.
8. Scott G. Plastic packaging and coastal pollution // *International Journal of Environmental Studies*. 1972. Vol. 3. P. 35–36.
9. Gregory M.R. Plastic pellets on New Zealand beaches // *Marine Pollution Bulletin*. 1977. Vol. 8. No. 4. P. 82.
10. *Marine Debris: sources, impacts, and solutions* / eds. J.E. Coe, D.B. Rogers. New York: Springer, 1997. 432 p.
11. *Marine Litter: A Global Challenge*. Nairobi: UNEP, 2009. 232 p.
12. Rüdell H., Müller J., Quack M. et al. Monitoring of hexabromocyclododecane diastereomers in fish from European freshwaters and estuaries // *Environmental Science and Pollution Research*. 2012. Vol. 19. P. 772–783.
13. 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/corrrev-2024-0143.
14. Derrike J.G.B. Marine pollution by plastic debris: an overview // *Marine Pollution Bulletin*. 2002. Vol. 44. P. 842–852. DOI: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.
15. Gregory M.R., Andrady A.L. *Plastics in the marine environment* // *Plastics and the environment* / ed. A.L. Andrady. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. P. 379–397.
16. Sheavly S., Register K.M. Marine debris & plastics: environmental concerns, sources, impacts and solutions // *Journal of Polymers and the Environment*. 2007. Vol. 15. P. 301–305.
17. Лаптев А.Б., Садков В.Р., Николаев Е.В., Зеленева Т.О. Влияние ветра на температуру и увлажнение образцов материалов при климатических испытаниях // *Труды ВИАМ*. 2025. № 2 (144). С. 112–120. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-112-120.
18. 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.
19. Orr D.W. *Earth in Mind: On Education, Environment, and the Human Prospect*. Washington: Island Press, 2004. 224 p.
20. 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.
21. Kablov E.N., Startsev V.O. The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: a Review // *Mechanics of Composite Materials*. 2021. Vol. 57. No. 5. P. 565–576. DOI: 10.1007/s11029-021-09979-6.
22. 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.
23. Katsanevakis S. Marine debris, a growing problem: Sources, Distribution, Composition, and Impacts // *Marine Pollution: New Research* / ed. T.N. Hofer. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2008. P. 53–100.
24. Nerland I.L., Halsband C., Allan I. et al. *Microplastics in marine environments: occurrence, distribution and effects*. Kristiansand: Norwegian Institute for Water Research, 2014. 72 p.
25. 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.

26. Bergmann M., Gutow L., Klages M. Modeling the Role of Microplastics in Bioaccumulation of Organic Chemicals to Marine Aquatic Organisms. A Critical Review // *Marine Anthropogenic Litter* / ed. A. Koelmans. Springer, 2015. P. 199–226. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3_11.
27. Teuten E.L., Saquing J.M., Knappe D.R. et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and the wildlife // *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2009. Vol. 364. P. 2027–2045.
28. Gray J.S., Waldichuk M., Newton A.J. et al. Pollution-induced changes in populations // *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 1979. Vol. 286. P. 545–561.
29. Goldberg E.D. Emerging problems in the coastal zone for the twenty-first century // *Marine Pollution Bulletin*. 1995. Vol. 31. P. 152–158.
30. Islam M.S., Tanaka M. Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis // *Marine Pollution Bulletin*. 2004. Vol. 48. P. 624–649.
31. Pauly D., Watson R., Alder J. Global trends in world fisheries: impacts on marine ecosystems and food security // *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2005. Vol. 360. P. 5–12.
32. Wang Z., DeWitt J., Higgins C. et al. A Never-ending story of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)? // *Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 51. No. 5. P. 2508–2518.
33. 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.
34. Ramirez-Lodra E., Mol B.D., Company J.B. et al. Effects of natural and anthropogenic processes in the distribution of marine litter in the deep Mediterranean Sea // *Progress in Oceanography*. 2013. Vol. 118. P. 273–287.
35. 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.
36. 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.
37. Teuten E.L., Rowland S.J., Galloway T.S. et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants // *Environmental Science & Technology*. 2007. Vol. 41. No. 22. P. 7759–7764.
38. Chua E.M., Shimeta J., Nugegoda D. et al. Assimilation of Polybrominated Diphenyl Ethers from Microplastics by the Marine Amphipod, *Allorchestes Compressa* // *Environmental Science & Technology*. 2014. Vol. 48. P. 8127–8134.
39. Gouin T., Roche N., Lohmann R. et al. A Thermodynamic Approach for Assessing the Environmental Exposure of Chemicals Absorbed to Microplastic // *Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 45. P. 1466–1472.
40. Koelmans A.A., Besseling E., Wegner A. et al. Plastic as a carrier of POPs to aquatic organisms. A model analysis // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47. P. 7812–7820.
41. Tomei M.C., Mosca Angelucci D., Ademollo N. et al. Rapid and effective decontamination of chlorophenol-contaminated soil by sorption into commercial polymers: Concept demonstration and process modelling // *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 150. P. 81–91.
42. Van Sebille E., England M.H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters // *Environmental Research Letters*. 2012. Vol. 7. P. 044040. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044040.
43. Van der Oost R., Beyer J., Vermeulen N.P.E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review // *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2003. Vol. 13. P. 57–149.
44. Selck H., Drouillard K., Eisenreich K. et al. Explaining differences between bioaccumulation measurements in laboratory and field data using a probabilistic modeling approach // *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2012. Vol. 8. P. 42–63.
45. Kotterman M., Chalberg T., Schaffer D. Viral Vectors for Gene Therapy: Translational and Clinical Outlook // *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2015. Vol. 17. P. 63–89. DOI: 10.1146/annurev-bioeng-071813-104938.

46. Richter E., Lay J.P., Klein W. et al. Enhanced elimination of hexachlorobenzene in rats by light liquid paraffin // *Chemosphere*. 1977. Vol. 6. P. 357–369.
47. Moser G.A., McLachlan M.S. A non-absorbable dietary fat substitute enhances elimination of persistent lipophilic contaminants in humans // *Chemosphere*. 1999. Vol. 39. P. 1513–1521.
48. UNEP Annual Report 2023 // UNEP. URL: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44777/UNEP_Annual_Report_2023.pdf?sequence=19 (дата обращения: 27.11.2025).
49. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. 2015. Vol. 347. P. 768–771.
50. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A. et al. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers // *Polymer Testing*. 2018. Vol. 65. P. 281–296. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.12.007.

References

1. *Marine debris pollution in the Pacific. Literature review*. Available at: https://www.sprep.org/attachments/2014SM25/Noumea/12NC_WP.7.7_Annex_1_Literature_review_-_Marine_Debris_Pacific_-_Final.pdf (accessed: November 27, 2025).
2. Heyerdahl T. Atlantic Ocean pollution and biota observed by the Ra expeditions. *Biological Conservation*, 1971, vol. 3, no. 2, pp. 164–167.
3. Carpenter E.J., Anderson S.J., Harvey G.R. et al. Polystyrene spherules in coastal waters. *Science*, 1972, vol. 173, pp. 749–750.
4. Venrick E.L., Backman T.W., Bartram W.C. et al. Man-made objects on the surface of the Central North Pacific Ocean. *Nature*, 1973, vol. 241, p. 271.
5. Colton Jr. J.B., Knapp F.D., Burns B.R. Plastic particles in surface waters of the Northwestern Atlantic. *Science*, 1974, vol. 185, pp. 491–497.
6. Holmstrom A. Plastic films on the bottom of the Skagerack. *Nature*, 1975, vol. 255, pp. 622–623.
7. Feder H.M., Jewett S.C., Hilsinger J.R. Man-made debris on the Bering Sea floor. *Marine Pollution Bulletin*, 1978, vol. 9, no. 2, pp. 52–53.
8. Scott G. Plastic packaging and coastal pollution. *International Journal of Environmental Studies*, 1972, vol. 3, pp. 35–36.
9. Gregory M.R. Plastic pellets on New Zealand beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 1977, vol. 8, no. 4, p. 82.
10. *Marine Debris: sources, impacts, and solutions*. Eds. J.E. Coe, D.B. Rogers. New York: Springer, 1997, 432 p.
11. *Marine Litter: A Global Challenge*. Nairobi: UNEP, 2009, 232 p.
12. Rüdell H., Müller J., Quack M. et al. Monitoring of hexabromocyclododecane diastereomers in fish from European freshwaters and estuaries. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, vol. 19, pp. 772–783.
13. 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), pp. 20240143. DOI: 10.1515/corrrev-2024-0143.
14. Derrike J.G.B. Marine pollution by plastic debris: an overview. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, vol. 44, pp. 842–852. DOI: 10.1016/S0025-326X(02)00220-5.
15. Gregory M.R., Andrady A.L. Plastics in the marine environment. *Plastics and the environment*. Ed. A.L. Andrady. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 379–397.
16. Sheavly S., Register K.M. Marine debris & plastics: environmental concerns, sources, impacts and solutions. *Journal of Polymers and the Environment*, 2007, vol. 15, pp. 301–305.
17. Laptev A.B., Sadkov V.R., Nikolaev E.V., Zeleneva T.O. Effect of wind on temperature and moisture content of material samples during climatic tests. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 112–120. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 27, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-112-120.
18. 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.

19. Orr D.W. *Earth in Mind: On Education, Environment, and the Human Prospect*. Washington: Island Press, 2004, 224 p.
20. 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.
21. Kablov E.N., Startsev V.O. The Influence of Internal Stresses on the Aging of Polymer Composite Materials: a Review. *Mechanics of Composite Materials*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 565–576. DOI: 10.1007/s11029-021-09979-6.
22. 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.
23. Katsanevakis S. Marine debris, a growing problem: Sources, Distribution, Composition, and Impacts. *Marine Pollution: New Research*. Ed. T.N. Hofer. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2008, pp. 53–100.
24. Nerland I.L., Halsband C., Allan I. et al. *Microplastics in marine environments: occurrence, distribution and effects*. Kristiansand: Norwegian Institute for Water Research, 2014, 72 p.
25. 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.
26. Bergmann M., Gutow L., Klages M. Modeling the Role of Microplastics in Bioaccumulation of Organic Chemicals to Marine Aquatic Organisms. A Critical Review. *Marine Anthropogenic Litter*. Ed. A. Koelmans. Springer, 2015, pp. 199–226. DOI: 10.1007/978-3-319-16510-3_11.
27. Teuten E.L., Saquing J.M., Knappe D.R. et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and the wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2009, vol. 364, pp. 2027–2045.
28. Gray J.S., Waldichuk M., Newton A.J. et al. Pollution-induced changes in populations. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 1979, vol. 286, pp. 545–561.
29. Goldberg E.D. Emerging problems in the coastal zone for the twenty-first century. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, vol. 31, pp. 152–158.
30. Islam M.S., Tanaka M. Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries and approach for management: a review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, vol. 48, pp. 624–649.
31. Pauly D., Watson R., Alder J. Global trends in world fisheries: impacts on marine ecosystems and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2005, vol. 360, pp. 5–12.
32. Wang Z., DeWitt J., Higgins C. et al. A Never-ending story of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)? *Environmental Science & Technology*, 2017, vol. 51, no. 5, pp. 2508–2518.
33. 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.
34. Ramirez-Lodra E., Mol B.D., Company J.B. et al. Effects of natural and anthropogenic processes in the distribution of marine litter in the deep Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 2013, vol. 118, pp. 273–287.
35. 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.
36. 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.
37. Teuten E.L., Rowland S.J., Galloway T.S. et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants. *Environmental Science & Technology*, 2007, vol. 41, no. 22, pp. 7759–7764.
38. Chua E.M., Shimeta J., Nugegoda D. et al. Assimilation of Polybrominated Diphenyl Ethers from Microplastics by the Marine Amphipod, *Allorchestes Compressa*. *Environmental Science & Technology*, 2014, vol. 48, pp. 8127–8134.

39. Gouin T., Roche N., Lohmann R. et al. A Thermodynamic Approach for Assessing the Environmental Exposure of Chemicals Absorbed to Microplastic. *Environmental Science & Technology*, 2011, vol. 45, pp. 1466–1472.
40. Koelmans A.A., Besseling E., Wegner A. et al. Plastic as a carrier of POPs to aquatic organisms. A model analysis. *Environmental Science & Technology*, 2013, vol. 47, pp. 7812–7820.
41. Tomei M.C., Mosca Angelucci D., Ademollo N. et al. Rapid and effective decontamination of chlorophenol-contaminated soil by sorption into commercial polymers: Concept demonstration and process modelling. *Journal of Environmental Management*, 2015, vol. 150, pp. 81–91.
42. Van Sebille E., England M.H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environmental Research Letters*, 2012, vol. 7, p. 044040. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044040.
43. Van der Oost R., Beyer J., Vermeulen N.P.E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2003, vol. 13, pp. 57–149.
44. Selck H., Drouillard K., Eisenreich K. et al. Explaining differences between bioaccumulation measurements in laboratory and field data using a probabilistic modeling approach. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2012, vol. 8, pp. 42–63.
45. Kotterman M., Chalberg T., Schaffer D. Viral Vectors for Gene Therapy: Translational and Clinical Outlook. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2015, vol. 17, pp. 63–89. DOI: 10.1146/annurev-bioeng-071813-104938.
46. Richter E., Lay J.P., Klein W. et al. Enhanced elimination of hexachlorobenzene in rats by light liquid paraffin. *Chemosphere*, 1977, vol. 6, pp. 357–369.
47. Moser G.A., McLachlan M.S. A non-absorbable dietary fat substitute enhances elimination of persistent lipophilic contaminants in humans. *Chemosphere*, 1999, vol. 39, pp. 1513–1521.
48. *UNEP Annual Report 2023*. Available at: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/44777/UNEP_Annual_Report_2023.pdf?sequence=19 (accessed: November 27, 2025).
49. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 2015, vol. 347, pp. 768–771.
50. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A. et al. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers. *Polymer Testing*, 2018, vol. 65, pp. 281–296. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.12.007.

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, ЮИЦ РАН, ssc-ras@ssc-ras.ru

Булышева Наталья Ивановна, заведующая лабораторией, к.б.н., ЮИЦ 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.