Научная статья

УДК 579.26:678.8
DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-180-188

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ГРИБЫ НА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ

А.А. Кривушина[1], Д.Н. Мосунова[1], Ю.С. Горяшник[1], Т.В. Яковенко[1]

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

Аннотация. *Проанализированы и обобщены данные по видовому составу микроскопических грибов, выделенных с полимерных материалов в различных природно-климатических регионах. Выделены более 250 штаммов микроскопических грибов, относящихся к 98 видам и 36 родам, большинство из которых являются анаморфами представителей отдела Ascomycota. Выделенные штаммы перспективны для исследований микробиологической стойкости материалов и эффективности биоцидных средств, применяемых в разных климатических регионах.*

Ключевые слова: *биоповреждения, климатические зоны, микромицеты-деструкторы, микромицеты-контаминанты, микроскопические грибы, полимеры*

Для цитирования: Кривушина А.А., Мосунова Д.Н., Горяшник Ю.С., Яковенко Т.В. Микроскопические грибы на полимерных материалах в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2026. № 11 (165). С. 180–188. URL: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-180-188.

Scientific article

MICROSCOPIC FUNGI ON POLYMERIC MATERIALS IN DIFFERENT CLIMATIC ZONES

A.A. Krivushina[1], D.N. Mosunova[1], Yu.S. Goryashnik[1], T.V. Yakovenko[1]

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

Abstract. *Data on the species composition of microscopic fungi isolated from polymeric materials in various climatic regions were analyzed and summarized. More than 250 microscopic fungal strains belonging to 98 species and 36 genera were isolated, most of them anamorphs of the Ascomycota phylum. The isolated strains hold promise for studies of the microbiological stability of materials and the effectiveness of biocidal agents used in various climatic regions.*

Keywords: *biodeterioration, climatic zones, micromycetes-destructors, micromycetes-contaminants, microscopic fungi, polymers*

For citation: Krivushina A.A., Mosunova D.N., Goryashnik Yu.S., Yakovenko T.V. Microscopic fungi on polymeric materials in different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2026, no. 11 (165), pp. 180–188. Available at: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-180-188.

Введение

Полимеры стали неотъемлемой частью современной жизни, однако их эксплуатация осложняется проблемой биологических повреждений. Даже новейшие биостойкие материалы не в полной мере защищены от воздействия микроорганизмов, среди которых особую опасность представляют микроскопические грибы, или микромицеты. Эти организмы обладают рядом свойств, позволяющих им успешно колонизировать

полимерные поверхности. К таким свойствам относятся широкий метаболический аппарат, быстрый рост биомассы, высокая адаптивность к изменениям температуры и влажности, способность проникать вглубь материала с помощью гиф. Наиболее благоприятные условия для развития микромицетов – температура 25–28 °С и влажность воздуха >90 %, соответственно, биоповреждения особенно распространены в тропических и субтропических регионах. Однако и в умеренных, и в северных широтах микромицеты способны развиваться на полимерах, снижая долговечность изделий и конструкций [1–3].

Комплексное изучение микромицетов, поражающих полимеры в разных климатических зонах, имеет большое практическое значение. Полученные в ходе таких исследований данные позволят усовершенствовать тест-наборы для оценки грибостойкости материалов в лабораториях, определить эффективность биоцидных препаратов против конкретных видов микромицетов, провести более точные испытания материалов и техники с учетом климатических условий эксплуатации, разработать биотехнологические методы переработки полимерных отходов с использованием культур микромицетов-деструкторов [4–7].

Цель работы – изучение видового состава микроскопических грибов, обнаруженных на поверхности полимерных материалов в различных климатических зонах.

Материалы и методы

Исследованные культуры микроскопических грибов получены из двух источников:

– образцы полимерных материалов после длительных натурных испытаний на микологических площадках. Испытания проводили в репрезентативных климатических зонах, классифицированных по ГОСТ 16350–80 [8, 9]. На площадках размещали микологические стенды с материалами следующих классов: резины, герметики, угле- и стеклопластики, полиуретаны, лакокрасочные покрытия, клеи и другие полимерные материалы. Проведение испытаний регламентировано ГОСТ 9.915–2023 [10]. Культуры микромицетов выделяли из очагов микробиологических повреждений после визуальных осмотров образцов в ходе и после экспозиции;

– участки, демонстрирующие признаки микробиологического повреждения, на действующих изделиях и технике, эксплуатируемых в различных климатических условиях.

Микромицеты выделяли методами прямого посева и отпечатков на твердые питательные среды (среда Чапека, сусло-агар).

Видовую идентификацию штаммов осуществляли в Курчатовском геномном центре, используя современные методы полногеномной таксономии. Таксономическая классификация базировалась на двух подходах: анализе геномных сигнатур и полноценном филогенетическом анализе по 255 маркерным однокопийным генам эукариот.

Таксономический анализ данных проводили на основании номенклатурной базы данных по царству грибов http://www.indexfungorum.org/Names/Names.asp. Климатические зоны классифицировали в соответствии с ГОСТ 16350–80 [8].

Результаты и обсуждение

Результаты натурных испытаний показали, что наиболее интенсивное развитие микробиологических повреждений – в форме налетов, обрастаний и пятен – наблюдается на образцах полимерных материалов, размещенных в условиях теплого климата. В рамках данного исследования такие проявления наиболее ярко выражены в Сочинском регионе. При этом важно отметить, что признаки биоповреждений не ограничиваются теплыми зонами: они также зафиксированы в умеренном и более холодном климате, хотя и проявляются только в летний период испытаний [1, 11].

Комплексный отбор проб с образцов полимерных материалов, размещенных на микологических площадках в разных климатических зонах, а также непосредственно с поверхности эксплуатируемых изделий и техники позволил выделить >250 чистых культур микроскопических грибов. Выделенные культуры охватывают 98 видов, относящихся к 36 родам. На основе полученных данных для каждой природно-климатической зоны сформирован список видов микромицетов, наиболее часто колонизирующих полимерные материалы и изделия. Этот перечень представлен в таблице и служит основой для дальнейшего анализа закономерностей распространения микробиологических повреждений в зависимости от климатических условий.

Виды микроскопических грибов, наиболее часто выделяемые с полимерных материалов и изделий в различных климатических зонах

Город	Тип климата*	Виды микроскопических грибов
Москва	Умеренный (представительный пункт)	*Acremonium sclerotigenum*, *Alternaria alternata*, *A. subcucurbitae*, *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *A. pseudodeflectus*, *A. sydowii*, *A. terreus*, *A. ustus*, *A. welwitschiae*, *Aureobasidium melanogenum*, *A. namibiae*, *Botrytis cinerea*, *Chaetomium angustispirale*, *Lecanicillium araneicola*, *Paecilomyces variotii*, *Penicillium citreosulfuratum*, *P. expansum*, *P. rubens*, *P. soliforme*, *Rhizopus arrhizus*, *Talaromyces marneffei*, *Trichoderma atroviride*, *T. harzianum*
Звенигород	Умеренный (представительный пункт)	*Acrodontium crateriforme*, *Akanthomyces muscarius*, *Alternaria alternata*, *Aspergillus fumigatus*, *A. parasiticus*, *A. welwitschiae*, *Cladosporium aggregatocicatricatum*, *C. australiense*, *Cosmospora lavitskiae*, *Dichotomopilus funicola*, *Epicoccum dendrobii*, *E. layuense*, *Fusarium langsethiae*, *Hormonema macrosporum*, *Neocucurbitaria juglandicola*, *Paecilomyces variotii*, *Penicillium atrosanguineum*, *P. bussumense*, *P. citreosulfuratum*, *P. manginii*, *P. rubens*, *Simplicillium lamellicola*, *Trichoderma hamatum*, *T. harzianum*
Владивосток	Умеренно влажный (представительный пункт)	*Alternaria alternata*, *Cladosporium australiense*, *Epicoccum layuense*, *Fusarium ipomoeae*, *Penicillium rubens*, *P. ubiquetum*
Геленджик	Умеренно теплый с мягкой зимой (экстремальный пункт)	*Alternaria alternata*, *A. oregonensis*, *Apiospora arundinis*, *Aureobasidium melanogenum*, *A. pullulans*, *Botrytis cinerea*, *Cladosporium australiense*, *C. oxysporum*, *C. phlei*, *C. puyae*, *Epicoccum layuense*, *Fusarium equiseti*, *Lichtheimia hongkongensis*, *Penicillium bussumense*, *Rhizopus arrhizus*, *Trichoderma atrobrunneum*
Сочи	Теплый влажный (экстремальный пункт)	*Alternaria alternata*, *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *Cladosporium australiense*, *C. oxysporum*, *Clonostachys rosea*, *Colletotrichum fioriniae*, *Fusarium culmorum*, *Penicillium citreosulfuratum*, *P. corylophilum*, *P. meleagrinum var. viridiflavum*, *P. quebecense*, *P. roqueforti*, *P. solitum*, *P. sumatraense*, *Pestalotiopsis rosea*, *Trichoderma atroviride*, *T. harzianum*, *Victoriomyces antarcticus*
Мурманск	Умеренный (экстремальный пункт)	*Aspergillus luchuensis*, *A. parasiticus*, *A. sydowii*, *Cladosporium phlei*, *C. puyae*, *Penicillium brevicompactum*, *P. kananaskense*, *P. manginii*, *P. nothofagi*, *P. roqueforti*, *P. solitum*, *P. velutinum*, *P. waksmanii*, *Phacidium grevilleae*
Якутск	Очень холодный (представительный пункт)	*Alternaria alternata*, *Aureobasidium melanogenum*, *Cladosporium phlei*, *Didymella pinodes*, *Nothophoma anigozanthi*, *Penicillium rubens*, *Trichoderma harzianum*
* В соответствии с ГОСТ 16350–80.		

Проведенный таксономический анализ данных показал, что подавляющее большинство выделенных микромицетов относятся к анаморфам представителей отдела *Ascomycota*, подотдела *Pezizomycotina* – 96 видов 34 родов. По данным научно-технической литературы, среди всех выделенных видов аскомицетов у 25 встречается совершенная стадия, однако наличие плодовых тел отмечено всего у 3: *Chaetomium angustispirale, Chaetomium globosum* и *Dichotomopilus funicola.*

Основное количество выделенных аскомицетов относится к классу *Eurotiomycetes* (41 вид), также широко представлены классы *Sordariomycetes* (31 вид) и *Dothideomycetes* (23 вида), к классу *Leotiomycetes* отнесены всего 2 вида, выявлены несколько видов аскомицетных грибов с неопределенным положением (*incertae sedis*). Все выделенные представители класса *Eurotiomycetes* относятся к одному порядку *Eurotiales*, семейству *Aspergillaceae*, это виды трех родов: *Aspergillus, Penicillium* и *Talaromyces.* Среди выделенных микромицетов класса *Sordariomycetes* преобладали представители порядка *Hypocreales* (23 вида), семейств *Hypocreaceae, Bionectriaceae, Nectriaceae, Cordycipitaceae, Ophiocordycipitaceae* с преобладанием видов родов *Fusarium* и *Trichoderma.* Отмечены по несколько видов порядка *Amphisphaeriales*, семейства *Pestalotiopsidaceae* (виды родов *Neopestalotiopsis* и *Pestalotiopsis*) и порядка *Sordariales*, семейства *Chaetomiaceae* (виды родов *Chaetomium* и *Dichotomopilus*). Единично присутствуют представители и других порядков данного класса: *Glomerellales, Cephalothecales* и *Coniochaetales.*

Среди микромицетов класса *Dothideomycetes* больше всего представителей порядка *Pleosporales* (9 видов), в основном это грибы из семейства *Pleosporaceae* (виды родов *Alternaria* и *Curvularia*) и *Didymellaceae* (виды рода *Epicoccum* и др.). Порядок *Dothideales* представлен несколькими видами с преобладанием грибов семейства *Saccotheciaceae* (виды рода *Aureobasidium*). Порядок *Cladosporiales*, семейство *Cladosporiaceae* представлены большим количеством видов рода *Cladosporium*. Единично присутствуют представители порядка *Mycosphaerellales.* Класс *Leotiomycetes* представлен грибами двух порядков – *Helotiales* (род *Botrytis*) и *Phacidiales* (род *Phacidium*).

Кроме аскомицетных грибов отмечены всего два представителя отдела *Mucoromycota*, класса *Mucoromycetes*, порядка *Mucorales*, это виды *Lichtheimia hongkongensis* и *Rhizopus arrhizus.*

Наибольшее видовое разнообразие отмечено для следующих родов микромицетов: 24 – *Penicillium*, 9 – *Aspergillus*, 9 – *Cladosporium*, 6 – *Fusarium*, 5 – *Talaromyces*, 4 – *Trichoderma*, 3 – *Alternaria*, 3 – *Aureobasidium*, 3 – *Epicoccum.*

Подавляющее большинство культур грибов относится к мицелиальным грибам, лишь несколько штаммов выделены в виде дрожжевых клеток, это виды рода *Aureobasidium – A. melanogenum, A. namibiae* и *A. pullulans*, для которых характерен мицелиально-дрожжевой диморфизм.

Анализ данных показал, что распределение микромицетов по климатическим зонам не демонстрирует выраженной видовой специфичности. Вместо этого прослеживается четкая связь между видовым составом грибных сообществ и типом материала-субстрата, на котором они развиваются. Например, на герметиках и резинах преимущественно колонизируют темноокрашенные грибы родов *Cladosporium* и *Alternaria*. Лакокрасочные покрытия чаще поражаются видами рода *Aspergillus*, тогда как синтетические ткани подвержены заселению представителями рода *Trichoderma* [12–14].

Особого внимания заслуживает вид *Alternaria alternata*, который стал абсолютным лидером по частоте встречаемости на полимерных материалах в различных регионах. Он выявлен в шести зонах: Москве, Звенигороде, Сочи, Геленджике, Якутске

и Владивостоке. Широкая распространенность и космополитичность этого вида объясняются высокой адаптивностью: штаммы *A. alternata* способны заселять самые разные материалы и активно участвовать в их биодеструкции [15].

Примечательно, что отдельные штаммы *A. alternata* обладают ферментативной активностью, позволяющей разлагать полиэтилен и микропластик. Благодаря этому свойству эти штаммы перспективны для применения в биоремедиационных технологиях, например, при очистке территорий от полимерных отходов или микропластикового загрязнения [16, 17]. Таким образом, изучение этого вида не только помогает понять механизмы биоповреждений полимеров, но и дает ключ к разработке экологически безопасных методов утилизации пластика.

На втором месте по частоте встречаемости в различных климатических зонах находится вид *Cladosporium australiense*. Он отмечен в четырех регионах: Звенигороде, Владивостоке, Геленджике и Сочи. Виды рода *Cladosporium* также часто выделяют с поверхности полимерных материалов, отмечена деструктивная способность многих штаммов по отношению к полимерным материалам [15, 18]. Еще 6 видов микромицетов отмечены на полимерных материалах в трех климатических регионах: *Aureobasidium melanogenum* – в Москве, Геленджике и Якутске, *Cladosporium phlei* – в Геленджике, Мурманске и Якутске, *Epicoccum layuense* – в Звенигороде, Владивостоке и Геленджике, *Penicillium citreosulfuratum* и *Trichoderma harzianum* – в Москве, Звенигороде и Сочи, *Penicillium rubens* – в Москве, Звенигороде и Владивостоке. Кроме того, 14 видов микромицетов отмечены в двух различных климатических зонах каждый: *Aspergillus flavus, A. niger, A. parasiticus, A. sydowii, A. welwitschiae, Botrytis cinerea, Cladosporium oxysporum, C. puyae, Paecilomyces variotii, Penicillium manginii, P. roqueforti, P. solitum, Rhizopus arrhizus* и *Trichoderma atroviride*. Грибы родов *Aspergillus, Paecilomyces, Penicillium* и *Trichoderma* также относятся к распространенным микромицетам, наиболее часто выделяемым с полимерных материалов [15, 19].

Полимерные материалы формируют особую экологическую нишу, привлекательную для микроскопических грибов. При этом важно различать виды, просто контаминирующие поверхность (в виде фрагментов мицелия или спор), и виды, активно участвующие в биодеструкционных процессах. Большинство микромицетов, выделяемых с поверхности полимерных изделий, относятся именно к первой группе.

Микробиологические повреждения можно условно разделить на две категории по характеру использования самого материала микроорганизмом [1]. В первом случае полимер служит лишь субстратом для прикрепления и обитания, а все необходимые питательные вещества микроорганизм получает из внешней среды. Воздействие на материал проявляется косвенно – через выделение агрессивных метаболитов, ферментов и органических кислот, необходимых для поддержания жизнедеятельности гриба [20]. Такие процессы могут приводить к постепенному ухудшению свойств материала, но не вызывают его быстрого разрушения. Во втором случае микроорганизм использует полимер не только как опору, но и как питательную среду. Это приводит к значительно более интенсивной и быстрой биодеструкции, поскольку метаболизм микроорганизма напрямую нацелен на трансформацию компонентов материала.

Ключевой вывод исследований – способность использовать полимерные компоненты в качестве источника питания определяется на уровне штамма, а не вида в целом. Хотя некоторые виды проявляют общую предрасположенность к биодеструкции, окончательную оценку деструктивного потенциала можно дать только после изучения конкретных штаммов.

Подтверждением этому служат результаты исследований штаммов *Aspergillus flavus*, выделенных в разных климатических условиях: все изученные образцы проявили

деструктивную активность по отношению к полимерным материалам. Полученные данные подчеркивают необходимость индивидуального тестирования штаммов для прогнозирования биостойкости материалов в различных условиях эксплуатации.

В рамках дальнейших исследований планируется провести комплексную оценку физиологических свойств и деструктивной способности всех выделенных штаммов микромицетов – как с точки зрения защиты материалов от биоповреждений, так и с позиции возможного использования грибов для биоремедиации полимерных отходов.

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

Заключения

Анализ видового состава микроскопических грибов, колонизирующих полимерные материалы, изделия и конструкции в различных природно-климатических регионах, позволил выявить ключевые группы микроорганизмов, участвующих в процессах биоповреждения. Основную долю микромицетов-контаминантов составили представители отдела *Ascomycota*, в подавляющем большинстве – анаморфные стадии. Наибольшую распространенность продемонстрировали виды родов *Penicillium, Aspergillus, Cladosporium, Fusarium, Talaromyces, Trichoderma, Alternaria* и *Aureobasidium*, что согласуется с данными предыдущих исследований, подтверждающих высокую адаптивность этих таксонов к разнообразным субстратам.

Важным выводом работы стало подтверждение того, что данные научно-технической литературы о встречаемости вида на полимерных материалах не могут служить достаточным основанием для отнесения его к деструкторам. Деструктивная способность – это индивидуальная характеристика штамма, обусловленная его физиологическими особенностями. Следовательно, для достоверной оценки участия микромицета в процессах биодеструкции необходимо проведение целенаправленных лабораторных исследований с каждым выделенным штаммом.

Практическое значение полученных результатов заключается в возможности использования выделенных штаммов микромицетов для решения ряда актуальных задач (проведение лабораторных испытаний микробиологической стойкости полимерных материалов и изделий с учетом специфики климатических условий их эксплуатации; разработка биотехнологических методов переработки пластиковых отходов, основанных на способности отдельных штаммов к деструкции полимеров; оценка эффективности биоцидных препаратов, предназначенных для защиты полимерных конструкций от биоповреждений в различных климатических регионах), что позволит повысить долговечность и надежность эксплуатации материалов.

Список источников

1. Кривушина А.А., Старцев В.О. Микромицеты-деструкторы полимерных материалов среди экстремофильных микроорганизмов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). С. 123–134. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-123-134.
2. Лаптев А.Б., Железняк В.Г., Турова Т.П., Соколова Д.Ш., Назина Т.Н. Влияние присутствия токсичных добавок в составе полимерного материала на процессы его биодеструкции в морской воде // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). С. 121–134. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-121-134.
3. Закирова Л.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Мовенко Д.А., Лаптев А.Б. Особенности формирования диффузионного слоя Sn–Zn–Fe на границе гальванотермического покрытия системы цинк–олово и стали 30ХГСА с высокой защитной способностью // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). С. 61–71. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 29.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-61-71.

4. Кураков А.В., Геворкян С.А., Гогинян В.Б., Озерская С.М. Разнообразие и особенности состава микроскопических грибов на синтетических полимерных материалах // Прикладная биохимия и микробиология. 2008. № 44 (2). С. 232–235.
5. Srikanth M., Sandeep T.S.R.S., Sucharitha K., Godi S. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review // Bioresources and Bioprocessing. 2022. Vol. 9 (1). P. 42. DOI: 10.1186/s40643-022-00532-4.
6. Кривушина А.А., Лаптев А.Б. Фунгициды: применение, свойства и принципы действия // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 155–168. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-155-168.
7. Кривушина А.А., Лаптев А.Б. Методы испытаний эффективности биоцидных препаратов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2026. № 1 (82). С. 267–278. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-267-278.
8. ГОСТ 16350–80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Изд-во стандартов, 1981. 140 с.
9. Старцев В.О., Старцев О.В., Зеленева Т.О., Варданян А.М. Влияние осадков на изменение массы образцов полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 136–154. URL: https://www.journal.viam.ru (дата обращения: 20.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-136-154.
10. ГОСТ 9.915–2023. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы неметаллические и изделия с их применением. Метод испытаний на микробиологическую стойкость в природных условиях в атмосфере. М.: РСТ, 2023. 12 с.
11. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
12. Lugauskas A., Levinskait L., Pečiulyt D. Micromycetes as deterioration agents of polymeric materials // International biodeterioration & biodegradation. 2003. Vol. 52 (4). P. 233–242.
13. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.H. Compendium of Soil Fungi. 2nd ed. Lubrecht & Cramer Ltd., 2007. 672 p.
14. Seifert K., Morgan-Jones G., Gams W., Kendrick B. The Genera of *Hyphomycetes* // CBS Biodiversity. Series 9. Utrecht, 2011. P. 1–102.
15. Sabev H.A., Barratt S.M., Greenhalgh M. et al. Biodegradation and biodeterioration of man-made polymeric materials // Fungi in biogeochemical cycles / ed. G.M. Gadd. Cambridge University Press, 2006. P. 212–235.
16. Gao R., Liu R., Sun C. A marine fungus *Alternaria alternata* FB1 efficiently degrades polyethylene // Journal of Hazardous Materials. 2022. Vol. 431. P. 128617. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128617.
17. Schindler Y., Zucker I. Microplastic Removal and Biodegradation by Native Mediterranean Fungus *Alternaria alternate* // ACS Environmental Science & Technology Water. 2025. Vol. 5. P. 4079–4088.
18. Bensch K., Groenewald J.Z., Dijksterhuis J. et al. Species and ecological diversity within the *Cladosporium cladosporioides* complex (*Davidiellaceae, Capnodiales*) // Studies in mycology. 2010. Vol. 67. P. 1–94. DOI: 10.3114/sim.2010.67.01.
19. Lugauskas A., Prosychevas I., Levinskaitė L., Jaskelevičius B. Physical and chemical aspects of long-term biodeterioration of some polymers and composites // Environmental Toxicology: An International Journal. 2004. Vol. 19 (4). P. 318–328.
20. Stroganov V.F., Kukoleva D.A., Akhmetshin A.S., Stroganov I.V. Biodeterioration of polymers and polymer composite materials // Polymer Science. Series D. 2009. Vol. 2 (3). P. 164–166. DOI: 10.1134/S1995421209030071.

References

1. Krivushina A.A., Startsev V.O. Micromycetes-destructors of polymeric materials among extremophilic microorganisms (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), pp. 123–134. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: March 29, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-123-134.
2. Laptev A.B., Zheleznyak V.G., Tourova T.P., Sokolova D.Sh., Nazina T.N. The effect of the presence of toxic additives in the polymer material on the processes of its biodegradation in seawater. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), pp. 121–134. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: March 29, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-121-134.
3. Zakirova L.I., Afanasyev-Khodykin A.N., Movenko D.A., Laptev A.B. Features of the formation of the Sn–Zn–Fe diffusion layer at the boundary of galvanothermal coating of systems zinc–tin and 30HGSA steel with high protec-tive capability. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), pp. 61–71. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: March 29, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-61-71.
4. Kurakov A.V., Gevorkyan S.A., Goginyan V.B., Ozerskaya S.M. Diversity and compositional features of microscopic fungi on synthetic polymeric materials. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2008, vol. 44, no. 2, pp. 232–235.
5. Srikanth M., Sandeep T.S.R.S., Sucharitha K., Godi S. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and Bioprocessing*, 2022, vol. 9 (1), p. 42. DOI: 10.1186/s40643-022-00532-4.
6. Krivushina A.A., Laptev A.B. Fungicides: application, properties and principles of action. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 155–168. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: March 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-155-168.
7. Krivushina A.A., Laptev A.B. Methods for testing the efficiency of biocidal agents (review). *Aviation materials and technologies*, 2026, no. 1 (82), pp. 267–278. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: March 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-267-278.
8. State Standard 16350–80. *Climate of the USSR. Zoning and Statistical Parameters of Climatic Factors for Technical Purposes*. Moscow: Standards Publ. House, 1981, 140 p.
9. Startsev V.O., Startsev O.V., Zeleneva T.O., Vardanyan A.M. Influence of precipitation on changes in the mass of samples of polymeric composite materials in open climatic conditions. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 136–154. Available at: http://www.journal.viam.ru (accessed: March 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-136-154.
10. State Standard 9.915–2023. *Unified System for Protection against Corrosion and Aging. Non-metallic Materials and Products Incorporating Them. Test Method for Microbiological Resistance under Natural Atmospheric Conditions*. Moscow: RST, 2023, 12 p.
11. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New-Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
12. Lugauskas A., Levinskait L., Pečiulyt D. Micromycetes as deterioration agents of polymeric materials. *International biodeterioration & biodegradation*, 2003, vol. 52 (4), pp. 233–242.
13. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.H. *Compendium of Soil Fungi*. 2nd ed. Lubrecht & Cramer Ltd., 2007, 672 p.
14. Seifert K., Morgan-Jones G., Gams W., Kendrick B. The Genera of *Hyphomycetes*. *CBS Biodiversity. Series 9*. Utrecht, 2011, pp. 1–102.
15. Sabev H.A., Barratt S.M., Greenhalgh M. et al. *Biodegradation and biodeterioration of man-made polymeric materials. Fungi in biogeochemical cycles*. Ed. G.M. Gadd. Cambridge University Press, 2006, pp. 212–235.
16. Gao R., Liu R., Sun C. A marine fungus *Alternaria alternata* FB1 efficiently degrades polyethylene. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 431, p. 128617. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128617.

17. Schindler Y., Zucker I. Microplastic Removal and Biodegradation by Native Mediterranean Fungus *Alternaria alternate*. *ACS Environmental Science & Technology Water*, 2025, vol. 5, pp. 4079–4088.
18. Bensch K., Groenewald J.Z., Dijksterhuis J. et al. Species and ecological diversity within the *Cladosporium cladosporioides* complex (*Davidiellaceae*, *Capnodiales*). *Studies in mycology*, 2010, vol. 67, pp. 1–94. DOI: 10.3114/sim.2010.67.01.
19. Lugauskas A., Prosychevas I., Levinskaitė L., Jaskelevičius B. Physical and chemical aspects of long-term biodeterioration of some polymers and composites. *Environmental Toxicology: An International Journal*, 2004, vol. 19 (4), pp. 318–328.
20. Stroganov V.F., Kukoleva D.A., Akhmetshin A.S., Stroganov I.V. Biodeterioration of polymers and polymer composite materials. *Polymer Science. Series D*, 2009, vol. 2 (3), pp. 164–166. DOI: 10.1134/S1995421209030071.

Информация об авторах

Кривушина Анастасия Александровна, ведущий научный сотрудник, к.б.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Мосунова Дарья Николаевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Горяшник Юлия Сергеевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Яковенко Татьяна Владимировна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anastasia A. Krivushina, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Daria N. Mosunova, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yulia S. Goryashnik, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatiana V. Yakovenko, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 16.07.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.08.2026.
The article was submitted 16.07.2026; approved and accepted for publication after reviewing 04.08.2026.