
Научная статья

УДК 620.193.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-123-134

МИКРОМИЦЕТЫ-ДЕСТРУКТОРЫ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ СРЕДИ ЭКСТРЕМОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ (обзор)

А.А. Кривушина¹, В.О. Старцев¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Экстремофильные микроорганизмы способны выживать при экстремальных условиях среды. Представлен обзор исследовательских работ по изучению экстремофильных микромицетов и поиску среди них видов, известных в качестве деструкторов полимерных материалов. Рассмотрены такие группы экстремофильных микромицетов, как термофилы, ксерофилы и олиготрофы, способные выживать при высоких значениях температуры, пониженной влажности и недостатке питательных веществ соответственно. В каждой группе таких микроорганизмов найдены виды микромицетов, которые неоднократно отмечены как деструкторы полимерных материалов.

Ключевые слова: экстремофильные микроорганизмы, экстремофилы, микромицеты-деструкторы, биоповреждения, термофилы, ксерофилы, олиготрофы, экологическая ниша

Для цитирования: Кривушина А.А., Старцев В.О. Микромицеты-деструкторы полимерных материалов среди экстремофильных микроорганизмов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-123-134.

Scientific article

MICROMYCETES-DESTRUCTORS OF POLYMERIC MATERIALS AMONG EXTREMOPHILIC MICROORGANISMS (review)

Anastasia A. Krivushina¹, Valery O. Startsev¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: Extremophilic microorganisms are able to survive under extreme environmental conditions. The article is devoted to a review of research works on the study of extremophilic micromycetes, as well as the search among them for species known as destructors of polymeric materials. Such groups of extremophilic micromycetes as thermophiles, xerophiles, and oligotrophs, capable of surviving at high ambient temperatures, low humidity and lack of nutrients, are considered. In each group of extremophilic microorganisms, species of micromycetes were found, which were repeatedly noted as destructors of polymer materials.

Keywords: extremophilic microorganisms, extremophiles, micromycetes-destructors, biodeterioration, thermophiles, xerophiles, oligotrophs, ecological niche

For citation: Krivushina A.A., Startsev V.O. Micromycetes-destructors of polymeric materials among extremophilic microorganisms (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-123-134.

Введение

Экстремофилы – это совокупность организмов, способных выживать при экстремальных условиях среды, таких как повышенные или пониженные температуры, отсутствие кислорода, соленость, кислотность среды, повышенное или пониженное давление и др. Экстремофилы обладают рядом необычных свойств, представляющих интерес как в теоретическом, так и в прикладном плане, – данные микроорганизмы активно используют в различных областях промышленности. Подавляющее большинство экстремофилов – это микроорганизмы, однако немало среди них и видов микроскопических грибов, или микромицетов. Экстремофильные микроорганизмы обитают в различных уголках планеты, где другие виды не способны выжить: в кратерах вулканов, на глубине океанов, в пустынях, в условиях вечной мерзлоты и во многих других местах, т. е. занимают специфические экологические ниши. Микромицеты-деструкторы различных материалов также занимают свою определенную экологическую нишу и приспосабливаются к выживанию способами, недоступными для многих других микроорганизмов. С помощью синтеза определенных метаболитов, в частности ферментов, деструкторы разлагают сложные компоненты материалов до более простых соединений, которые в дальнейшем используют в качестве источника питания [1–6]. Микромицеты-экстремофилы активно используют свой ферментативный аппарат, позволяющий им не только выживать, но и динамично развиваться в экстремальных условиях среды. Выделяемые экстремофилами ферменты, как правило, обладают повышенной активностью и стабильностью, а также проявляют высокую устойчивость не к одному, а к нескольким факторам среды [7].

Экстремофилы можно разделить на множество различных групп в зависимости от условий, к которым они приспособлены. Однако и эти классификации не являются взаимоисключающими. Довольно распространенными являются ситуации, когда экстремофилы попадают под несколько категорий сразу – такие микроорганизмы называют полиэкстремофилами. Например, бактерия *Thermococcus barophilus* является одновременно термофилом и барофилом, т. е. выживает в условиях высоких значений как температуры, так и давления [8]. С данной точки зрения большой интерес представляет поиск среди экстремофильных микромицетов штаммов, способных к деструкции полимерных материалов. С учетом условий эксплуатации полимерных материалов и изделий, а также их применения наибольший интерес представляют термофильные, ксерофильные и олиготрофные микромицеты. В данной статье рассмотрены указанные группы экстремофилов и их возможности вызывать деструкцию различных материалов.

Термофильные микромицеты

К термофилам относят различные группы микроорганизмов, способных выживать при достаточно высоких температурах (более +45 °С), в том числе и микроскопические грибы, или микромицеты, для которых диапазон температуры выживания находится в пределах от 45 до 60 °С. Способность к выживанию в условиях повышенных температур объясняется наличием у грибов специальных ферментов, которые работают при высоких температурах. В научно-технической литературе можно встретить термины «термофильные микроорганизмы» и «термотолерантные микроорганизмы». Термофильные микроорганизмы развиваются при повышенных температурах, термотолерантные – при нормальных (до +35 °С), но способны оставаться жизнеспособными и при более высоких температурах.

У микромицетов-термофилов особый состав клеточных мембран, который содержит липидно-белковый комплекс, включающий насыщенные жирные кислоты с разветвленной углеродной цепочкой. Благодаря этому происходит поддержание

ригидности клетки и нативной структуры мембраны в условиях повышенной температуры. Термофильные микромицеты также широко используют во многих отраслях промышленности благодаря особенности их ферментов, которые при высоких температурах более активны, что позволяет ускорить или качественно изменить некоторые технологические процессы. Основная область промышленного применения данных микромицетов связана именно с этим свойством [9, 10].

В ряде случаев под термином «термофилы» подразумевают все микроорганизмы, обитающие в тропических и субтропических условиях. Известно, что в странах с подобным климатом микробиологические повреждения различных объектов, материалов и изделий возникают наиболее часто. В том случае если среди термофильных микроорганизмов присутствует много деструкторов, то вполне вероятно взаимосвязь между термофильностью и деструктивной активностью микроорганизмов, в частности микромицетов.

В работе [11] изучали термофильные микромицеты, выделенные из отвалов угольных предприятий. Выделены виды *Aspergillus fumigatus* и *Thermomyces lanuginosus*, которые выдерживают температуру до 60 °С и при этом способны разлагать гемицеллюлозу. Штаммы того же вида *Aspergillus fumigatus* известны как активные деструкторы ряда материалов, а также авиационного топлива и других нефтепродуктов [12–16]. Микромицеты данного вида широко распространены на полимерных материалах в складских, рабочих помещениях и вне их [17, 18]. При микологическом анализе авиационного топлива, используемого в сверхзвуковой авиации, из топливных образцов часто изолируют непигментированные штаммы *Aspergillus fumigatus*. Этот гриб обладает высокой резистентностью не только к перепадам температуры, но и к другим условиям – перепадам влажности и изменениям рН среды. Споры *Aspergillus fumigatus* способны выживать при колебаниях температуры от –32 до +60 °С в водной фазе, а в авиационном керосине – при более широком диапазоне температур: от –32 до +80 °С [19–21].

Отмечена деструктивная активность термофильных и термотолерантных микромицетов таких родов, как *Aspergillus*, *Thermomyces*, *Myceliophthora*, *Thermomucor* и *Candida*. Грибы успешно росли на средах, содержащих в качестве единственного источника углерода кукурузную солому и картон, при температуре 45 °С [22].

Термофильные виды микромицетов *Myceliophthora thermophila* [22] и *Myceliophthora heterothallica* в работе [23] описаны как биопреобразователи остатков лигноцеллюлозы в сахара. Отмечено, что данные грибы могут использоваться в промышленности для переработки жома сахарного тростника и последующем производстве биоэтанола второго поколения. Схожую ферментативную активность показала культура термофильного гриба *Thermoascus aurantiacus* в исследованиях по биоразложению растительной биомассы [24]. Еще в одном исследовании термофильные микромицеты *Myceliophthora thermophila* и *Thielavia terrestris* гидролизуют все основные полисахариды, которые присутствуют в изучаемой растительной биомассе [25].

Большую полисахарид-деградирующую активность показали термофильные микромицеты, принадлежащие к видам *Thermothelomyces thermophila*, *Thermomyces thermophilus* и *Mycothermus thermophilus*. Данные штаммы представляют интерес как деструкторы различных растительных отходов сельского хозяйства, а также как модификаторы углеводсодержащих соединений [26].

Таким образом, практически все термофильные виды грибов, описанные в научно-технической литературе, представляют интерес в промышленных масштабах как производители ферментов, разрушающих углеводсодержащую биомассу при высоких температурах. Те же классы ферментов могут оказывать прямое или косвенное

воздействие на широкий круг неметаллических материалов, таких как различные полимерные материалы, резины, герметики, лакокрасочные покрытия, углепластики и др. Поэтому с высокой долей вероятности можно полагать, что группа термофильных микромицетов содержит потенциальные деструкторы полимерных материалов.

Ксерофильные микромицеты

К ксерофилам относят микроорганизмы, которые способны выживать в условиях пониженной влажности, – это обитатели пустынь, полупустынь, песчаных дюн и других засушливых районов, у которых хорошо развит механизм регуляции водного обмена. Данные микроорганизмы в ходе эволюции научились сохранять воду внутри организма, в частности могут использовать метаболическую воду, образующуюся благодаря окислению липидов. Как и в предыдущей группе экстремофилов, здесь различают ксерофильные микроорганизмы, живущие в условиях пониженной влажности, и ксеротолерантные микроорганизмы, способные жить в условиях нормальной влажности (30–60 %), однако они выживают и при пониженном содержании влаги.

Следует отметить, что в большинстве случаев микробиологические повреждения возникают, как правило, в условиях повышенной влажности и температуры. Однако известны случаи биоповреждений и в условиях пониженной влажности, т. е. среди микромицетов-деструкторов встречаются ксерофильные и ксеротолерантные виды. Одним из ярких примеров присутствия микромицетов-деструкторов среди ксерофильных грибов являются биоповреждения книг и архивных документов в библиотеках и книгохранилищах, а также экспонатов в музеях и пр. При исследовании микобиоты помещений Российской национальной библиотеки выделено 49 видов микромицетов, относящихся к 17 родам. По количеству видов преобладали роды *Penicillium*, *Aspergillus*, *Acremonium*, *Cladosporium*, *Paecilomyces* и *Torula*. Показано, что среди грибов, выделенных из воздуха библиотеки и с поверхности книг и документов, доминировали ксерофильные виды, такие как *Aspergillus fumigatus*, *A. niger*, *A. ochraceus*, *A. versicolor*, *Penicillium aurantiogriseum*, *P. brevicompactum*, *P. chrysogenum* и др. [27]. В исследовании микобиоты помещений Государственного Эрмитажа выделено 85 видов грибов из 37 родов. По количеству видов также преобладали представители анаморфных грибов *Penicillium*, *Aspergillus*, *Acremonium* и *Cladosporium*. Непосредственно из небольших очагов биоповреждений в здании музея удалось выделить штамм *Aspergillus sp.*, который плохо развивался на стандартных питательных средах. Из очага биоповреждений на питательную среду с пониженной активностью воды также удалось выделить светлоокрашенный штамм ксерофильного микромицета, который не был идентифицирован [28].

В работе [29] выделены микромицеты-деструкторы *Aspergillus carbonarius* и *Alternaria alternata* из очагов биоповреждений архивных картонных коробок. Показано, что наибольшей ксеротолерантностью обладает штамм *Aspergillus carbonarius*. При этом отмечено, что низкая активность воды стимулирует выделение пигмента у культуры гриба, что свидетельствует о возникновении большой опасности для сохранности архивных документов даже в нормальных условиях хранения. В работе [30] при изучении биоповреждений в музейных фондах удалось выделить культуры грибов только на среды с пониженной активностью воды, т. е. выделенные деструкторы оказались экстремальными ксерофилами, – это штаммы видов *Aspergillus penicilloides*, *Eurotium amstelodami* и *Eurotium sp.*

Часто у микроорганизмов способность переносить высокую сухость сочетается с термофильностью, т. е. способностью выдерживать высокие температуры. Так, в работе [31] из почвы выщелочного чернозема выделены термофильные и ксерофильные

представители видов *Paecilomyces lilacinum*, *Aspergillus candidum* и *Acremonium alternatum*. Известно, что эти же виды широко распространены на полимерных материалах [17].

Ксерофильные виды распространены и среди микромицетов, вызывающих биоповреждения в жилых помещениях. Как отмечено в работе [32], в жилых помещениях формируется комплекс ксеротолерантного сообщества микромицетов, что отражается на большей доле ксеротолерантных и ксерофильных микромицетов, в том числе видах рода *Aspergillus*, по сравнению с комплексом грибов в городских почвах. Основными видами, составляющими комплекс микобиоты помещений в г. Москве, являются виды родов *Penicillium* и *Aspergillus*. Данные микромицеты преобладают по частоте встречаемости как в домашней пыли, так и в воздухе. В жилых помещениях г. Москвы отмечено не менее 50 видов рода *Penicillium* и не менее 22 видов рода *Aspergillus*. Наиболее часто отмечены микромицеты *Penicillium cyclopium*, *P. frequentas*, *P. chrysogenum*, *Aspergillus repens*, *A. Versicolor* и *Cladosporium cladosporioides* [32]. Всего же в помещениях г. Москвы выявлено более 148 видов микромицетов, относящихся к 45 родам [33].

Таким образом, среди ксерофильных микромицетов отмечено большое количество как подтвержденных биодеструкторов, так и контаминантов материалов, среди которых могут присутствовать потенциальные деструкторы.

Олиготрофные микромицеты

Группа олиготрофных микроорганизмов объединяет микроорганизмы, которые обитают на субстратах с низким содержанием питательных веществ. Как правило, под этими субстратами подразумевают такие места обитания, как сухие степи, пустыни, верховые болота и др. Олиготрофы приспособились к жизни в таких условиях благодаря способностям более эффективного поглощения питательных веществ, а также их эффективного хранения.

Таксономическое разнообразие олиготрофных микромицетов довольно велико. Среди них нередко встречаются виды, отмеченные в других работах как деструкторы материалов. Так, в работе [34] из верхнего слоя почвы мезоолиготрофного болота выделено 73 вида микромицетов с преобладающими родами *Mortierella*, *Geomyces*, *Cephalosporium*, *Paecilomyces*, *Penicillium* и *Trichoderma*. Как известно, среди представителей всех перечисленных родов нередко встречаются и штаммы видов с деструктивной активностью в отношении полимерных материалов [17, 35–41].

В исследовании [42] выделен 31 вид микромицетов из 18 родов, заселяющих почву сульфатно-содового засоления пустыни Гоби (Монголия), которые отнесены к двум экологическим группам. В первую группу входили грибы, способные к существованию в условиях содового засоления: галоалкалофильные и галоалкалотолерантные микромицеты. Выделение таких культур возможно только с использованием специальных щелочных питательных сред. Ко второй группе относили в основном космополитичные виды, такие как *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Syncephalastrum*, *Trichoderma* и *Ulocladium*. Среди указанных родов грибов известно много деструкторов. Кроме того, в отличие от предыдущей группы, эти штаммы выделялись на стандартные питательные среды, такие как сусло-агар, среда Чапека, голодный агар, т. е. способны к росту на разных субстратах.

В песках хвостохранилища, которое подвергали рекультивации более 40 лет назад, выделено 26 видов микромицетов, в свеженамытых песках – 12 видов микромицетов [43]. В рекультивируемых песках численно доминировал вид *Trichoderma viride*, известный в научно-технической литературе своей деструктивной способностью. В свеженамытых песках отмечено отсутствие доминантов, однако чаще

других встречается вид *Penicillium thomii*. Среди микромицетов песков и песчаных почв природного и антропогенного происхождения выявлены представители таких родов, как *Acremonium*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Gliocladium*, *Mortierella*, *Mucor*, *Penicillium* и *Trichoderma*, среди которых теоретически могут быть штаммы с деструктивной активностью. В работе [44] отмечено, что представители рода *Penicillium* наиболее широко представлены среди микромицетов рекультивируемых хвостохранилищ и составляют более 50 % от всего видового разнообразия выделенных грибов. В песчаных почвах природного генезиса микромицеты рода *Penicillium* также преобладали по разнообразию, всего отмечено восемь видов. Микромицеты рода *Penicillium* являются одними из наиболее распространенных грибов с отмеченной деструктивной активностью. Представителей данного рода регулярно выделяют с различных материалов и изделий, подвергшихся биоповреждениям: с поверхности зданий, строительных материалов, произведений искусства, архивных бумаг и книг в книгохранилищах, из различных масел, смазок, нефтепродуктов и др. [17, 35–41]. Виды рода *Penicillium* преобладают по численности среди грибов, заселяющих объекты культурного наследия на территории Республики Куба [45].

Микологический анализ образцов почв песчаных карьеров на севере Западной Сибири показал наличие 51 вида микромицетов из 25 родов [46]. Как и в предыдущих работах, наиболее многочисленным по видам оказался род *Penicillium*. Представители рода отмечены в 90 % исследованных проб, чаще других встречаются такие виды, как *Penicillium lanosum* и *Penicillium glauco-lanosum*. В группу доминирующих грибов вошел и отмеченный ранее в других работах вид *Trichoderma viride*, а также другие представители рода *Trichoderma*. Кроме того, в грунтах карьеров, в отличие от микобиоты растительных ценозов, отмечают довольно большое присутствие представителей зигомицетов, особенно представителей рода *Mucorales* (мукоровые грибы): *Absidia*, *Mortierella*, *Mucor* и *Rhizopus*. Мукоровые грибы также являются активными деструкторами полимерных материалов, различных изделий, зданий, памятников и др. [17].

Заключения

Все типы микробиологических повреждений можно условно разделить на две группы по характеру использования материала микроорганизмом. К первой группе относят биоповреждения, когда материал используется микроорганизмами лишь как место обитания, а все необходимые питательные элементы они получают из окружающего пространства. В целом микромицеты-деструкторы из данной группы по своему типу питания можно отнести к олиготрофным микроорганизмам, поскольку для своего развития они используют ограниченное количество питательных веществ, которые удается получить из частиц пыли, оседающих на материал. Ко второй группе относят биоповреждения, когда сам материал или его компонент используются как источник питания для микроорганизма. Среди обеих групп деструкторов можно встретить как термофильные и термотолерантные, так и ксерофильные и ксеротолерантные виды микроорганизмов.

Таким образом, при широком рассмотрении термина «экстремофильность» следует отметить, что микроорганизмы-деструкторы материалов могут быть включены в данную группу, поскольку они биохимическими путями приспособились к существованию в специфической эконише, недоступной для других организмов. Когда же деструкторы выделяют как отдельную группу, то ее видовые представители нередко встречаются и среди других экстремофильных групп, таких как термофилы, ксерофилы или олиготрофы. Поиск и изучение экстремофильных микроорганизмов-деструкторов, а также механизмов их адаптации представляет большой интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Статья подготовлена в рамках выполнения работ по гранту РФФИ № 20-53-56009 «Исследование воздействия факторов окружающей среды на лакокрасочные покрытия в условиях сухого субтропического климата».

Список источников

1. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
2. Каблов Е.Н., Ерофеев В.Т., Светлов Д.А., Смирнов В.Ф., Богатов А.Д. Биоповреждения в космических аппаратах // Сб. Междунар. науч.-техн. конф. «Композиционные материалы. Теория и практика». Пенза: Приволжский дом знаний, 2015. С. 40–46.
3. Кривушина А.А., Горяшник Ю.С. Способы защиты материалов и изделий от микробиологического поражения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-80-86.
4. Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Яковенко Т.В., Николаев Е.В. Методы хранения микроорганизмов-деструкторов в коллекции ФГУП «ВИАМ» // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-89-94.
5. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites. Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Engineering Systems. 2020, vol. 1687, art. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012029.
6. Севастьянов Д.В., Сутубалов И.В., Дасковский М.И., Шеин Е.А. Полимерные биоконкомпозиты на основе биоразлагаемых связующих, армированных натуральными волокнами (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4. С. 42–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-42-50.
7. Морозкина Е.В., Слуцкая Э.С., Федорова Т.В. и др. Экстремофильные микроорганизмы: биохимическая адаптация и биотехнологическое применение (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2010. Т. 46. № 1. С. 5–20.
8. Marteinsson V.T., Birrien J.L., Reysenbach A.L. et al. Thermococcus barophilus sp.nov., a new barophilic and hyperthermophilic archaeon isolated under high hydrostatic pressure from a deep-sea hydrothermal vent // International Journal of Systematic Bacteriology. 1999. Vol. 49. No. 2. P. 351–359. DOI: 10.1099/00207713-49-2-351.
9. Cooney D.G., Emerson R. Thermophilic fungi. An account of their biology, activities and classification. San Francisco; London: W.H. Freeman & Co, 1964. No. 15. P. 25–35.
10. Кузякина Т.И. Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов на активных вулканах и в гидротермах (Остров Кунашир, Курильские острова, Камчатка). Владивосток: Дальнаука, 2004. 251 с.
11. Калинина А.Е., Соколянская Л.О., Глухова Л., Карначук О.В. Выделение термофильных микромицетов из мест горения угля // Старт в науку: материалы LXVII науч. студ. конф. Биологического института (Томск, 23–27 апр. 2018 г.). Томск, 2019. С. 77.
12. Картавцева З.М., Коваль Э.З., Калаганов В.А., Ляпунов Н.А. Деструкция дизельного топлива микроорганизмами в циркуляционных системах // Микробиологический журнал. 1989. Т. 51. № 4. С. 87–94.
13. Gaylarde C.C., Bento F.M., Kelley J. Microbial contamination of stored hydrocarbon fuels and its control // Revista de Microbiologia. 1999. Vol. 30. No. 1. P. 1–10.
14. Bento F.M., Beech I.B., Gaylarde C.C. et al. Degradation and corrosive activities of fungi in a diesel–mild steel–aqueous system // World journal of microbiology and biotechnology. 2005. Vol. 21. No. 2. P. 135–142.
15. McNamara C.J., Perry T.D., Leard R. et al. Corrosion of aluminum alloy 2024 by microorganisms isolated from aircraft fuel tanks // Biofouling. 2005. Vol. 21. No. 5. P. 257–265.
16. Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Николаев Е.В., Славин А.В. Механизмы микробиологической деструкции углеводородного топлива и других нефтепродуктов микромицетами (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3. С. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-66-71.

17. Лугаускас А.Ю., Микульскене А.И., Шляужене Д.Ю. Каталог микромицетов – биодеструкторов полимерных материалов. М.: Наука, 1987. С. 258–259.
18. Злочевская И.В. Экологические группы грибов, повреждающих материалы, и их особенности // Биологические науки. 1987. № 8. С. 81–87.
19. Scott J.A., Forsyth T.J. Thermophilic microorganisms in aircraft fuel // International Biodeterioration Bulletin. 1976. Vol. 12. No. 1. P. 1–4.
20. Thomas A.R., Hill E.C. *Aspergillus fumigatus* and supersonic aviation // International Biodeterioration Bulletin. 1977. Vol. 13. No. 1. P. 1–4.
21. Каневская И.Г. Биологическое повреждение промышленных материалов. Л.: Наука, 1984. 232 с.
22. Moretti M.M.S., Martins D.A.B., Silva R.D., Rodrigues A. Selection of thermophilic and thermotolerant fungi for the production of cellulases and xylanases under solid-state fermentation // Brazilian Journal of Microbiology. 2012. Vol. 43 (3). P. 1062–1071. DOI: 10.1590/S1517-838220120003000032.
23. Brink J.V.D., Harman-van Muiswinkel G.C.J., Theelen B.J.F. Efficient plant biomass degradation by thermophilic fungus *Myceliophthora heterothallica* // Applied and Environmental microbiology. 2012. Vol. 79 (4). DOI: 10.1128/AEM.02865-12.
24. McClendon S.D., Bath T., Petzold C.J. et al. *Thermoascus aurantiacus* is a promising source of enzymes for biomass deconstruction under thermophilic conditions // Biotechnology for biofuels. 2012. No. 5 (54). P. 1–9.
25. Berka R.M., Grigoriev I.V., Otilar R. et al. Comparative genomic analysis of the thermophilic biomass-degrading fungi *Myceliophthora thermophila* and *Thielavia terrestris* // Nature Biotechnology. 2011. Vol. 29. No. 10. P. 922–927. DOI: 10.1038/nbt.1976.
26. Балабанова Л.А., Бакунина И.Ю., Слепченко Л.В. и др. Полисахарид-деградирующая активность морских и наземных штаммов мицелиальных грибов // Биоорганическая химия. 2018. Т. 44. № 4. С. 425–432.
27. Горяева А.Г., Великова Т.Д., Добрусина С.А. Микобиота воздуха и композитов бумаги с полимерными покрытиями в Российской национальной библиотеке // Микология и фитопатология. 2010. Т. 44. № 1. С. 10–18.
28. Смоляницкая О.Л. Микромицеты как потенциальные агенты биоповреждения культурных ценностей и стратегия защиты от них в Государственном Эрмитаже: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2007. 26 с.
29. Гончарова И.А., Сабадаха Е.Н., Тригубович А.М., Черная Н.В. Микологический анализ промышленных материалов, контаминированных микроскопическими грибами // Труды БГТУ. Сер. 2. 2020. № 2. С. 163–168.
30. Ребрикова Н.Л., Понизовская В.Б. Экстремально ксерофильные грибы, обнаруженные в музейных фондах // Современная микология в России: тез. докладов. Сер. 6. 2015. Т. 5. С. 298–300.
31. Кувшинова Н.М., Свистова И.Д., Гулиева Д.З. Состав и структура комплекса микромицетов чернозема выщелоченного // Развитие современной науки: теоретические и прикладные аспекты. 2016. № 3. С. 173–175.
32. Желтикова Т.М., Антропова А.Б., Биланенко Е.Н. и др. Плесневые грибы жилых помещений // РЭТ-инфо. 2006. № 1. С. 31–36.
33. Антропова А.Б., Мокеева В.Л., Биланенко Е.Н. и др. Аэромикота жилых помещений г. Москвы // Микология и фитопатология. 2003. Т. 37. Вып. 6. С. 1–11.
34. Сизоненко Т.А., Хабибуллина Ф.М., Загирова С.В. Почвенная микробиота мезо-олиготрофного болота средней тайги // Микология и фитопатология. 2016. Т. 50. Вып. 2. С. 115–123.
35. Митковская Т.И., Коваль Э.З. Оценка роли микромицетов, выделенных с произведений искусства // Тез. докладов II съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2008. Т. 2. С. 374–375.
36. Катаев А.Д., Кураков А.В. Микробная колонизация и деструкция биоразлагаемых синтетических материалов на основе полигидроксibuтирата и полигидроксивалериата в почвах // Тез. докладов III съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2012. Т. 3. С. 218–219.

37. Балюта А.А., Важинская И.С. Стойкость современных строительных материалов к плесневому поражению // Тез. докладов III съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2012. Т. 3. С. 210.
38. Огаркова Г.Р., Буковская Н.Е., Самусенок Л.В., Огарков Б.Н. Биоповреждения пористых строительных материалов ассоциациями специфичных микроорганизмов // Тез. докладов III съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2012. Т. 3. С. 224–225.
39. Мамаева Н.Ю., Великова Т.Д., Горяева А.Г. Биоповреждения бумаги микромицетами в условиях различной освещенности // Тез. докладов IV съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2017. Т. 6. С. 418–420.
40. Попихина Е.А., Трепова Е.С. Микодеструкторы строительных материалов // Тез. докладов IV съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2017. Т. 6. С. 424–426.
41. Халмурадова П.А., Мезитова Л.Д., Алатби А.Х. и др. Микромицеты-деструкторы старых зданий г. Казани: анализ метаболитов и подбор биоцидов // Тез. докладов IV съезда микологов России «Современная микология в России». М.: Нац. академия микологии, 2017. Т. 6. С. 415.
42. Георгиева М.Л., Грум-Гржимайло А.А., Ямнова И.А., Биланенко Е.Н. Мицелиальные грибы в почвах сульфатно-содового засоления пустыни Гоби (Монголия) // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46. Вып. 1. С. 27–32.
43. Редькина В.В. Биологическая активность первичных почв на нефелиновых песках хвостохранилищ ОАО «Апатит» (Мурманская область) // Биологический мониторинг природно-техногенных систем: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с Междунар. участием. Кировск: Лобань, 2011. Ч. 1. С. 148–152.
44. Евдокимова Г.А., Корнейкова М.В., Лебедева Е.В., Калмыкова В.В. Микромицеты в песках и песчаных почвах природного и техногенного генезиса // Микология и фитопатология. 2009. Т. 43. Вып. 2. С. 84–92.
45. Rojas T.I., Aira M.J., Batista A. et al. Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana (Cuba) // Grana. 2012. Vol. 51. Is. 1. P. 44–51.
46. Сумина О.И., Власов Д.Ю., Долгова Л.Л., Сафронова Е.В. Особенности формирования сообществ микромицетов в зарастающих песчаных карьерах севера Западной Сибири // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. 2010. Вып. 2. С. 84–90.

References

1. Kablov E.N. The key problem is materials. Trends and guidelines for innovative development in Russia. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.
2. Kablov E.N., Erofeev V.T., Svetlov D.A., Smirnov V.F., Bogatov A.D. Biodamage in space vehicles. *Int. scientific and technical conf. "Composite materials. Theory and practice"*. Penza: Privolzhsky House of Knowledge, 2015, pp. 40–46.
3. Krivushina A.A., Goryashnik Yu.S. Ways of protection of materials and products from microbiological damage (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-80-86.
4. Krivushina A.A., Bobyreva T.V., Yakovenko T.V., Nikolaev E.V. Methods of microorganisms-destructors storage in FSUE «VIAM» collection (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, No. 3 (56), pp. 89–94. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2019-0-3-89-94.
5. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites. *Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Engineering Systems. 2020*, vol. 1687, art. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012029.
6. Sevastyanov D.V., Sutubalov I.V., Daskovskij M.I., Shein E.A. Polymer biocomposites based on biodegradable binders reinforced by natural fibers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 42–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-42-50.

7. Morozkina E.V., Slutsкая E.S., Fedorova T.V. et al. Extremophilic microorganisms: biochemical adaptation and biotechnological application (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 5–20.
8. Marteinson V.T., Birrien J.L., Reysenbach A.L. et al. Thermococcus barophilus sp.nov., a new barophilic and hyperthermophilic archaeon isolated under high hydrostatic pressure from a deep-sea hydrothermal vent. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1999, vol. 49, no. 2, pp. 351–359. DOI: 10.1099/00207713-49-2-351.
9. Cooney D. G., Emerson R. *Thermophilic fungi. An account of their biology, activities and classification*. San Francisco ; London: W.H. Freeman & Co, 1964, no. 15, pp. 25–35.
10. Kuzyakina T.I. *Ecology and geochemical activity of microorganisms on active volcanoes and in hydrothermal waters*. Vladivostok: Dalnauka, 2004, 251 p.
11. Kalinina A.E., Sokolyanskaya L.O., Glukhova L., Karnachuk O.V. Isolation of thermophilic micromycetes from coal combustion sites. *Start in science: materials LXVII scientific. stud. conf. Biological Institute. Tomsk*, 2019, p. 77.
12. Kartavtseva Z.M., Koval E.Z., Kalaganov V.A., Lyapunov N.A. Destruction of diesel fuel by microorganisms in circulation systems. *Mikrobiologicheskii zhurnal*, 1989, vol. 51, no. 4, pp. 87–94.
13. Gaylarde C.C., Bento F.M., Kelley J. Microbial contamination of stored hydrocarbon fuels and its control. *Revista de Microbiologia*, 1999, vol. 30, no. 1, pp. 1–10.
14. Bento F.M., Beech I.B., Gaylarde C.C. et al. Degradation and corrosive activities of fungi in a diesel – mild steel – aqueous system. *World journal of microbiology and biotechnology*, 2005, vol. 21, no. 2, pp. 135-142.
15. McNamara C. J., Perry T.D., Leard R. et al. Corrosion of aluminum alloy 2024 by microorganisms isolated from aircraft fuel tanks. *Biofouling*, 2005, vol. 21, no. 5, pp. 257–265.
16. Chertishchev V.Yu., Ospennikova O.G., Boichuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Determination of the size and depth of defects in multilayer PCM honeycomb structures based on the mechanical impedance value. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 72–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-72-94.
17. Lugauskas A.Yu., Mikulskene A.I., Shlyauzhene D.Yu. *Catalog of micromycetes-biodegradants of polymeric materials*. Moscow: Nauka, 1987, pp. 258–259.
18. Zlochevskaya I.V. Ecological groups of fungi damaging materials and their features. *Biologicheskiiye nauki*, 1987, no. 8, pp. 81–87.
19. Scott J.A., Forsyth T.J. Thermophilic microorganisms in aircraft fuel. *International Biodeterioration Bulletin*, 1976, vol. 12.No. 1, pp. 1-4.
20. Thomas A.R., Hill E.C. Aspergillus fumigatus and supersonic aviation. *International Biodeterioration Bulletin*, 1977, vol. 13.No. 1, pp. 1-4.
21. Kanevskaya I.G. *Biological damage to industrial materials*. Leningrad: Nauka, 1984, 232 p.
22. Moretti M.M.S., Martins D.A.B., Silva R.D., Rodrigues A. Selection of thermophilic and thermotolerant fungi for the production of cellulases and xylanases under solid-state fermentation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2012, vol. 43 (3), pp. 1062–1071. DOI: 10.1590/S1517-838220120003000032.
23. Brink J.V.D., Harman-van Muiswinkel G.C.J., Theelen B.J.F. Efficient plant biomass degradation by thermophilic fungus Myceliophthora heterothallica. *Applied and Environmental microbiology*, 2012, vol. 79 (4). DOI: 10.1128/AEM.02865-12.
24. McClendon S.D., Batth T., Petzold C.J. et al. Thermoascus aurantiacus is a promising source of enzymes for biomass deconstruction under thermophilic conditions. *Biotechnology for biofuels*, 2012, no. 5 (54), pp. 1–9.
25. Berka R. M., Grigoriev I. V., Otilar R. et al. Comparative genomic analysis of the thermophilic biomass-degrading fungi Myceliophthora thermophila and Thielavia terrestris. *Nature Biotechnology*, 2011, vol. 29, no. 10, pp. 922–927. DOI: 10.1038/nbt. 1976.
26. Balabanova L.A., Bakunina I.Yu., Slepchenko L.V. and other Polysaccharide-degrading activity of marine and terrestrial strains of filamentous fungi. *Bioorganicheskaya khimiya*, 2018, vol. 44, no. 4, pp. 425–432.

27. Goryaeva A.G., Velikova T.D., Dobrusina S.A. Mycobiota of air and composites of paper with polymer coatings in the Russian National Library. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2010, vol. 44, no. 1, pp. 10–18.
28. Smolyanitskaya O.L. *Micromycetes as potential agents of biological damage to cultural property and a strategy of protection against them in the State Hermitage*: thesis abstracts, Cand. Sc. (Bio). St Petersburg, 2007, 26 p.
29. Goncharova I.A., Sabadakha E.N., Trigubovich A.M., Black N.V. Mycological analysis of industrial materials contaminated with microscopic fungi. *Trudy BGTU*, Ser. 2, 2020, no. 2, pp. 163–168.
30. Rebrikova N.L., Ponizovskaya V.B. Extremely xerophilic fungi found in museum funds. *Modern mycology in Russia*: abstracts reports. Ser. 6, 2015, vol. 5, pp. 298–300.
31. Kuvshinova N.M., Svistova I.D., Gulieva D.Z. The composition and structure of the mycomycete complex of leached chernozem. *Razvitiye sovremennoy nauki: teoreticheskiye i prikladnyye aspekty*, 2016, no. 3, pp. 173–175.
32. Zheltikova T.M., Antropova A.B., Bilanenko E.N. et al. Molds for living quarters. *RET-info*, 2006, no. 1, pp. 31–36.
33. Antropova A.B., Mokeeva V.L., Bilanenko E.N. and other Aeromikota living quarters in Moscow. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2003, vol. 37, is. 6, pp. 1–11.
34. Sizonenko T.A., Khabibullina F.M., Zagirova S.V. Soil microbiota of the meso-oligotrophic bog of the middle taiga. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2016, vol. 50, 2, pp. 115–123.
35. Mitkovskaya T.I., Koval E.Z. Assessment of the role of micromycetes isolated from works of art. *Abstracts of the II congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia"*. Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2008, vol. 2, pp. 374–375.
36. Kataev A.D., Kurakov A.V. Microbial colonization and destruction of biodegradable synthetic materials based on polyhydroxybutyrate and polyhydroxyvalerate in soils. *Abstracts of the III congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia"*. Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2012, vol. 3, pp. 218–219.
37. Baluta A.A., Vazhinskaya I.S. Resistance of modern building materials to mold damage. *Abstracts of the III congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia"*. Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2012, vol. 3, p. 210.
38. Ogarkova G.R., Bukovskaya N.E., Samusenok L.V., Ogarkov B.N. Biodamage of porous building materials by associations of specific microorganisms. *Abstracts of the III congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia"*. Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2012, vol. 3, pp. 224–225.
39. Mamaeva N.Yu., Velikova T.D., Goryaeva A.G. Biodamage of paper by micromycetes under conditions of different illumination. *Abstracts of the IV congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia"*. Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2017, vol. 6, pp. 418–420.
40. Popikhina E.A., Trepova E.S. Microdestructors of building materials. Tez. reports of the IV congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia". Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2017, vol. 6, pp. 424–426.
41. Khalmuradova P.A., Mezitova L.D., Alatbi A.Kh. et al. Micromycetes-destructors of old buildings in Kazan: analysis of metabolites and selection of biocides. *Abstracts of the IV congress of mycologists of Russia "Modern mycology in Russia"*. Moscow: Nat. Academy of Mycology, 2017, vol. 6, pp. 415.
42. Georgieva M.L., Grum-Grzhimailo A.A., Yamnova I.A., Bilanenko E.N. Filamentous fungi in the soils of sulfate-soda salinization of the Gobi Desert (Mongolia). *Mikologiya i fitopatologiya*, 2012, vol. 46, 1, pp. 27–32.
43. Redkina V.V. Biological activity of primary soils on nepheline sands of tailing dumps of JSC "Apatit" (Murmansk region). *Biological monitoring of natural-technogenic systems: materials of All-Russian scientific-practical conf. with Int. participation*. Kirovsk: Loban, 2011, part 1, pp. 148–152.

44. Evdokimova G.A., Korneikova M.V., Lebedeva E.V., Kalmykova V.V. Micromycetes in sands and sandy soils of natural and technogenic genesis. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2009, vol. 43, is. 2, pp. 84–92.
45. Rojas T. I., Aira M. J., Batista A. et al. Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana (Cuba). *Grana*, 2012, vol. 51, is. 1, pp. 44–51.
46. Sumina O.I., Vlasov D.Yu., Dolgova L.L., Safronova E.V. Features of the formation of communities of micromycetes in overgrown sand pits in the north of Western Siberia. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta*, Ser. 3, 2010, is. 2, pp. 84–90.

Информация об авторах

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

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 30.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 10.12.2021.
The article was submitted 30.11.2021; approved after reviewing 10.12.2021; accepted for publication 10.12.2021.