

ISSN 1029-8940 (Print)
ISSN 2524-230X (Online)
УДК 582.28:579:26
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-2-114-123>

Поступила в редакцию 25.08.2022
Received 25.08.2022

В. В. Карманова¹, Т. Г. Шабашова¹, Ю. Г. Гигиняк², М. Г. Синявская³

¹*Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, Минск, Республика Беларусь*

³*Институт генетики и цитологии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

ВИДОВОЙ СОСТАВ МИКРОМИЦЕТОВ СТАНЦИЙ «ПРОГРЕСС», «ГОРА ВЕЧЕРНЯЯ», «НОВОЛАЗОРЕВСКАЯ» (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

Аннотация. Выживание грибов в условиях Антарктиды является следствием как экологического отбора, так и эволюционной адаптации, выраженной на физиологическом, метаболическом, структурном и генетическом уровнях. Изучение биологического разнообразия антарктических микромицетов поможет глубже понять пути расселения грибов в биосфере, а также расширить представление о их роли в экстремальных экосистемах. Кроме того, микромицеты экстремальных местообитаний являются перспективными объектами биотехнологии.

Цель работы – изучить видовое разнообразие микроскопических грибов на природных и антропогенно привнесенных субстратах в районах исследовательских станций Восточной Антарктиды «Прогресс», «Новолазаревская», «Гора Вечерняя».

Для выделения микромицетов в культуру использовали традиционные методы изоляции, для определения видового состава – микробиологические и молекулярно-генетические методы. В результате микологического анализа выделено и идентифицировано 46 видов микромицетов из 22 родов и 3 отделов. Проведен таксономический анализ, определены доминирующие роды микромицетов: *Thelebolus*, *Penicillium*, *Acremonium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Geomyces*, *Cadophora*, *Rhodotorula*, *Cryptococcus*. Проанализированы температурозависимые особенности роста микромицетов: большинство выделенных видов являются психротрофными. Наибольшее видовое разнообразие микромицетов отмечено в почвах с растительными и животными включениями, наименьшее – на каменистых субстратах.

Ключевые слова: антарктические микромицеты, экстремофильные микроорганизмы, психрофилия, антарктические оазисы, таксономическое разнообразие, экстремальные экосистемы

Для цитирования: Видовой состав микромицетов станций «Прогресс», «Гора Вечерняя», «Новолазаревская» (Восточная Антарктида) / В. В. Карманова [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. бiял. навук. – 2023. – Т. 68, № 2. – С. 114–123. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-2-114-123>

Veronika V. Karmanova¹, Tatyana G. Shabashova¹, Yury G. Hihiniak², Marina G. Sinyavskaya³

¹*V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

²*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources,
Minsk, Republic of Belarus*

³*Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

SPECIES COMPOSITION OF MICROMYCETES AT THE PROGRESS, VECHERNYAYA GORA, AND NOVOLAZOREVSKAYA STATIONS (EAST ANTARCTICA)

Abstract. The survival of fungi in Antarctica is a consequence of both ecological selection and evolutionary adaptation expressed at the physiological, metabolic, structural, and genetic levels. The study of the biological diversity of Antarctic micromycetes will help us to better understand the pathways of fungal dispersal in the biosphere, as well as to broaden our understanding of their role in extreme ecosystems. In addition, micromycetes of extreme habitats are the promising objects of biotechnology.

The purpose of the work is to study the biological diversity of microscopic fungi on natural and anthropogenically introduced substrates in the East Antarctica research areas of Progress, Novolazarevskaya, and Mount Vechernyaya stations.

Traditional isolation methods were used to isolate micromycetes in culture. To determine the species composition, microbiological and molecular genetic methods were used. As a result of mycological analysis, 46 species of micromycetes from 22 genera and 3 phylum were identified. The taxonomic analysis was made and the dominant genera of micromycetes were identified: *Thelebolus*, *Penicillium*, *Acremonium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Geomyces*, *Cadophora*, *Rhodotorula*, *Cryptococcus*. The temperature-dependent growth features of micromycetes were analyzed: most of the isolated species were psychrotrophic. The greatest species diversity of micromycetes was noted in soils with plant and animal inclusions, the smallest – on stony substrates.

Keywords: antarctic micromycetes, extremophilic microorganisms, psychrophilia, antarctic oases, taxonomic diversity, extreme ecosystems

For citation: Karmanova V. V., Shabashova T. G., Hihiniak Yu. G., Sinyavskaya M. G. Species composition of micromycetes at the Progress, Vechernyaya Gora, and Novolazorevskaya stations (East Antarctica). *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya biyalagichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 114–123 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-2-114-123>

Введение. Антарктические экосистемы уникальны, поскольку характеризуются, во-первых, широким набором экстремальных для живых организмов факторов среды (низкие температуры, высушивание, высокое УФ-излучение), а во-вторых – минимальной антропогенной нагрузкой.

Грибные сообщества Антарктиды участвуют в круговороте питательных веществ и углерода в наземных и морских экосистемах, выступают в качестве симбионтов, мутуалистов, патогенов и сапротрофов, образующих сложную биологическую сеть вместе с другими организмами, и являются моделью для изучения коэволюции симбиоза в экстремальных условиях.

Экстремальные климатические условия Антарктиды создают сильное селективное давление, которое может привести к развитию новых механизмов стрессоустойчивости местных микроорганизмов, в том числе и грибов. По этой причине в последние годы расширились исследования адаптированных к холоду микромицетов, что обусловлено их потенциальной ценностью для применения в биотехнологии [1].

Исследование микобиоты Антарктиды началось в 1960-х годах. Изначально изучение микроскопических грибов проводилось с применением микробиологических методов, позднее стали набирать популярность молекулярно-генетические методы. На сегодняшний день из различных антарктических субстратов выделено более 1000 видов микромицетов, однако, по мнению многих специалистов, предполагаемое число грибов значительно выше. Из-за небольшого числа исследованных районов видовой состав микроскопических грибов в почвах полярных пустынь нельзя считать окончательно установленным, поскольку виды с низкой встречаемостью и/или плотностью популяции выделяются только при значительной повторности. Анализ материалов с новых территорий (островов) постоянно увеличивает видовой состав антарктических микромицетов [2].

Цель работы – изучить биологическое разнообразие микроскопических грибов на природных и антропогенно привнесенных субстратах в районах исследовательских станций Восточной Антарктиды «Прогресс», «Новолазаревская», «Гора Вечерняя».

Материалы и методы исследования. Сбор материала для исследования осуществлялся ведущим научным сотрудником Научно-практического центра НАН Беларуси по биоресурсам, кандидатом биологических наук Ю. Г. Гигиняком в районе российских антарктических станций «Прогресс», «Новолазаревская» и белорусской полевой базы «Гора Вечерняя» (рис. 1).

Для выделения микромицетов в культуру использовали традиционные методы изоляции, для определения видового состава – микробиологические (прямой посев фрагментов субстрата, приготовление серии разведений) и молекулярно-генетические (анализ по ITS районам) методы.

Образцы проб отбирались согласно общепринятым методам и с соблюдением условий стерильности.

В работе изучены пробы субстратов естественного и антропогенного происхождения, изолированные в окрестностях и служебно-жилых модулях исследовательских станций Восточной Антарктиды. Образцы были разделены на несколько групп в соответствии с типом субстрата:

1) пробы горных пород (мелкоземы с каменистыми примесями, эндолиты). Эндолиты – это верхний слой коренных пород с обитающими в порах между частицами камней организмами (грибами, бактериями, лишайниками или водорослями) (рис. 2). Образцы эндолитов собирали с помощью молотка и зубила путем откалывания верхних слоев коренных пород.

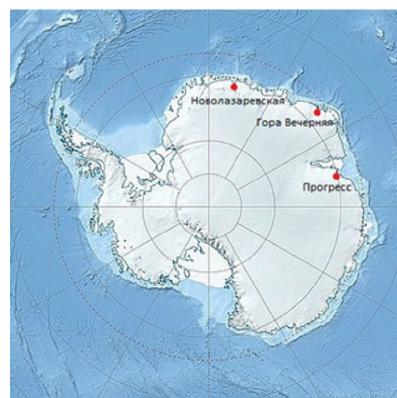


Рис. 1. Районы исследования

Fig. 1. Study areas



Рис. 2. Эндолиты
Fig. 2. Endoliths



Рис. 3. Субстраты животного происхождения
Fig. 3. Substrates of animal origin



Рис. 4. Субстраты растительного происхождения
Fig. 4. Substrates of plant origin

2) пробы почвы с животными включениями, представляющие собой фрагменты почвы с перьями, гуано, костями птиц (рис. 3);

3) пробы почвы с растительными остатками цианобактериальных матов, мхов, лишайников (рис. 4);

4) сухие и влажные пробы верхнего горизонта почвы без растительных и животных примесей;

5) пробы антропогенного происхождения (представляют собой лоскуты ткани, этикетки от пищевых продуктов, собранные в окрестностях исследовательских станций);

6) пробы керна донных отложений оз. Нижнее (полевая база «Гора Вечерняя») (кern представляет собой образец горной породы, извлеченный из скважины посредством специально предназначенного для этого вида бурения).

Основные методы исследования грибов в лаборатории включали: выделение в культуру, идентификацию и исследование чистых культур грибов, световую микроскопию, молекулярно-генетические методы (выделение и очистка грибной ДНК, амплификация, постановка сиквенсовой реакции, очистка продуктов сиквенсовой реакции).

При микроскопической идентификации грибного разнообразия предварительно проводился прямой трехкратный посев фрагментов субстрата на питательную среду с последующим культивированием образцов в разных температурных условиях (4, 18, 22, 25 °C) для выявления психрофильных, психротрофных (психротолерантных) и мезофильных микромицетов.

В качестве питательной среды использовали картофельный агар с дрожжевым экстрактом, агар Чапека, мясопептонный агар.

Посев на питательную среду осуществляли несколькими методами:

1) прямой посев фрагментов субстрата на питательную среду;

2) приготовление серии разведений по методу Коха с последующим высевом суспензий на питательную среду (метод применяли для проб почв): 10 г пробы субстрата смешивали со 100 мл дистиллированной воды с последующим перемешиванием раствора на качалке (45 мин, 28 °C). Получив таким образом 10^0 разведение, проводили серию разведений, количество которых варьировалось в зависимости от предполагаемого количества микроорганизмов в образце: чем больше предполагаемое число микроорганизмов в пробе, тем больше разведений необходимо. Далее осуществляли высев на плотные среды с использованием стерильных пипетки и шпателя [3].

Видовую принадлежность и таксономические особенности устанавливали по определителям для разных групп грибов [4–7].

Для идентификации отдельных видов микромицетов применяли молекулярно-генетические методы. Для выделения грибной ДНК из чистой культуры использовали, согласно протоколам, 5 %-ную смолу Chelex и 5 %-ный СТАВ-буфер.

Состав буфера с Chelex: 5 % Chelex, 0,5 мкл Triton X-100, 9 мл воды.

Состав СТАВ-буфера: 1 мл TRIS, 2,77 мл NaCl, 0,5 г СТАВ, 0,2 РvР40, 20 мкл меркаптоэтанола, 4 мл воды.

Для забора материала использовали стерильные палочки для буккального эпителия.

Выделенную ДНК осаждали путем центрифугирования (10 мин при 12 000 об/мин) и последующего добавления 80 % этанола, высушивали и растворяли в 20–30 мкл воды в зависимости от количества осадка. Концентрацию ДНК измеряли с помощью спектрофотометра NanoDrop.

Для проведения амплификации использовали ПЦР-смесь следующего состава: 2 мкл грибной ДНК (50–100 нг), 7,5 мкл готовой смеси ArtMix («АртБиоТех»), 1 мкл (5 пмоль) прямого праймера ITS1 (5' TCC GTA GGT GAA CCT GCG G '3) («Праймтех»), 1 мкл (5 пмоль) обратного праймера ITS4 (5' TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC '3) («Праймтех»), 3,5 мкл воды.

Амплификацию проводили в термоциклере С1000 (BioRad) (объем 15 мкл) в следующем режиме: 95 °С – 2 мин (1 цикл), 40 циклов: 95 °С – 10 с, 58 °С – 15 с, 67 °С – 15 с (1 цикл), 12 °С – до остановки.

Разделение продуктов амплификации проводили в 2 %-ном агарозном геле с использованием 1×ТАЕ-буфера, для окрашивания применяли бромистый этидий. Для визуализации результатов электрофореза использовали прибор Gel Doc XR (BioRad).

Переочистку продуктов ПЦР для проведения сиквенсовой реакции осуществляли с помощью экзонуклеазы I (Eco I) и рекомбинантной щелочной фосфатазы (rSAP) согласно рекомендации производителя (Thermo Fisher).

Последовательность ДНК определяли по методу Сэнгера. Сиквенсовую реакцию проводили по протоколу фирмы-производителя, используя набор BrilliantDye Terminator v3.1 (Nimagen). Состав: 0,75 мкл Sequencing Buffer, 0,5 мкл RR Sequencing Premix, 0,5 мкл ПЦР-продукта, 1 мкл (5 пмоль) праймера ITS 1 и 2,95 мкл воды.

Сиквенсовую реакцию проводили в амплификаторе MJ Mini (объем 5 мкл) в следующем режиме: 96 °С – 45 с (1 цикл), 34 цикла: 96 °С – 10 с, 50 °С – 5 с, 60 °С – 2 мин, 12 °С – до остановки.

Подготовленный и высушенный фрагмент ДНК затем растворяли в формамиде и отдавали в центр «Геном» Института генетики и цитологии НАН Беларуси для секвенирования на приборе ABI 3100 Genetic Analyser. Полученные нуклеотидные последовательности анализировали с помощью программ Finch TV, UGENE, BLASTn.

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных исследований выявлено 46 видов микромицетов, относящихся к 22 родам и 3 отделам: Ascomycota, Basidiomycota и Mucoromycota.

Большинство исследованных проб были изолированы в окрестностях станции «Прогресс». В результате из различных природных и антропогенно привнесенных субстратов станции «Прогресс» было выделено 39 видов микромицетов 19 родов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Биологическое разнообразие микромицетов станции «Прогресс»

T a b l e 1. Biological diversity of micromycetes at the Progress station

Микромицет	Субстрат
<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl.	Почва, антропогенно привнесенные материалы, растительные субстраты
<i>Alternaria tenuissima</i> (Kunze: Fr.) Wiltshire	Почва
<i>Acremonium charticola</i> (Lindau) W. Gams	Почва
<i>Acremonium strictum</i> W. Gams	Почва, растительные субстраты
<i>Acremonium sp.</i>	Почва
<i>Aspergillus duricaulis</i> Raper & Fennell	Почва, животные субстраты
<i>Aspergillus niger</i> Tiegh.	Почва, антропогенные субстраты

Окончание табл. 1

Микромицет	Субстрат
<i>Aspergillus ochraceus</i> G. Wilh.	Почва, животные субстраты
<i>Aspergillus terreus</i> Thom	Почва, животные субстраты
<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen.	Почва, антропогенно привнесенные материалы
<i>Aspergillus sp.</i>	Почва
<i>Cadophora malorum</i> (Kidd & Beaumont) W. Gams*	Почва, антропогенные материалы
<i>Chaetomium atrobrunneum</i> L. M. Ames	Почва, растительные субстраты
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze	Почва, животные субстраты
<i>Chaetomium megalocarpum</i> Bainier	Почва
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G. A. de Vries*	Почва, антропогенно привнесенные материалы
<i>Collariella bostrychodes</i> (Zopf) X. Wei Wang & Samson (<i>Chaetomium bostrychodes</i>)	Почва, животные субстраты
<i>Cryptococcus sp.</i> *	Почва
<i>Cystobasidium laryngis</i> (Reiersöl) Yurkov, Kachalkin, H. M. Daniel, M. Groenew., Libkind, V. de García, Zalar, Gouliam., Boekhout & Begerow*	Почва
<i>Geotrichum candidum</i> Link	Почва
<i>Mucor racemosus</i> Fresen.	Почва
<i>Penicillium citrinum</i> Thom	Почва
<i>Penicillium chrysogenum</i> Thom*	Почва
<i>Penicillium cyclopium</i> Westling	Почва, животные субстраты
<i>Penicillium expansum</i> Link	Почва, животные субстраты
<i>Penicillium glabrum</i> (Wehmer) Westling	Растительные субстраты
<i>Penicillium griseofulvum</i> Dierckx	Почва
<i>Penicillium lanosum</i> Westling	Почва, животные субстраты
<i>Penicillium lividum</i> Westling	Почва
<i>Phoma herbarum</i> Westendorp	Почва, растительные субстраты
<i>Phoma leveillei</i> Boerema & G. J. Bollen	Почва
<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D. L. Lindner*	Почва, животные и растительные субстраты
<i>Rhizopus microsporus</i> Tiegh.*	Почва
<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.*	Почва, животные субстраты
<i>Trichoderma koningii</i> Oudem	Почва
<i>Trichoderma viride</i> Pers.	Почва, растительные субстраты
<i>Trichosporiella cerebriformis</i> (G. A. de Vries & Kleine-Natrop) W. Gams	Почва
<i>Verticillium album</i> Licop.	Каменные субстраты

Примечание. Здесь и в табл. 2–4: * – молекулярная идентификация вида.

Из почв, растительных и животных субстратов, изолированных в окрестностях станции «Новолазаревская», было выделено 10 видов микромицетов, относящихся к 7 родам (табл. 2).

Таблица 2. Биологическое разнообразие микромицетов станции «Новолазаревская»

Table 2. Biological diversity of micromycetes at the Novolazarevskaya station

Микромицет	Субстрат
<i>Aspergillus ochraceus</i> G. Wilh.	Почва, животные субстраты
<i>Aspergillus terreus</i> Thom	Животные субстраты
<i>Cadophora malorum</i> (Kidd & Beaumont) W. Gams*	Почва
<i>Chaetomium atrobrunneum</i> L. M. Ames	Растительные субстраты
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G. A. de Vries*	Почва
<i>Penicillium chrysogenum</i> Thom*	Почва
<i>Penicillium cyclopium</i> Westling	Почва, животные субстраты
<i>Penicillium lanosum</i> Westling	Почва, животные субстраты
<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D. L. Lindner*	Почва, животные и растительные субстраты
<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.*	Почва, животные субстраты

Для полевой базы «Гора Вечерняя» и ее окрестностей исследована микобиота служебно-жи-
лых модулей, а также керн донных отложений озера Нижнее. В результате выявлено 23 вида
микроспоридий 15 родов (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Биологическое разнообразие микроспоридий станции «Гора Вечерняя»

T a b l e 3. Biological diversity of micromycetes at the Mount Vechernyaya station

Микроспоридий	Субстрат
<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl.	Антропогенно привнесенные материалы
<i>Aspergillus niger</i> Tiegh.	Почва, антропогенно привнесенные материалы
<i>Aspergillus ustus</i> (Bainier) Thom & Church	Почва
<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen.	Почва, антропогенные материалы
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary) G. Arnaud	Почва
<i>Cadophora malorum</i> (Kidd & Beaumont) W. Gams*	Почва, растительные субстраты
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze	Почва, керн донных отложений
<i>Chaetomium megalocarpum</i> Bainier	Почва, керн донных отложений
<i>Cladosporium sphaerospermum</i> Penz.*	Керн донных отложений
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G. A. de Vries*	Почва, пыль, антропогенно привнесенные материалы
<i>Cladosporium sp.</i>	Почва
<i>Cystobasidium laryngis</i> (Reiersöl) Yurkov, Kachalkin, H. M. Daniel, M. Groenew., Libkind, V. de García, Zalar, Gouliam., Boekhout & Begerow*	Почва, керн донных отложений
<i>Geotrichum candidum</i> Link	Пыль
<i>Naganishia diffluens</i> (Zach) Xin Zhan Liu, F. Y. Bai, M. Groenew. & Boekhout, in Liu, Wang, Göker, Groenewald, Kachalkin, Lumsch, Millanes, Wedin, Yurkov, Boekhout & Bai*	Керн донных отложений
<i>Orbicula parietina</i> (Schröd.) S. Hughes*	Пыль
<i>Penicillium chrysogenum</i> Thom*	Почва, керн донных отложений
<i>Penicillium glabrum</i> (Wehmer) Westling	Растительные субстраты
<i>Penicillium sp.</i>	Почва
<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D. L. Lindner*	Почва, животные субстраты
<i>Talaromyces purpureogenus</i> Samson, N. Yilmaz, Houbraken, Spierenb., Seifert, Peterson, Varga & Frisvad*	Керн донных отложений
<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.*	Почва, животные субстраты
<i>Trichoderma viride</i> Pers.	Растительные субстраты
<i>Trichoderma sp.</i>	Почва

Наибольшее видовое разнообразие отмечалось для отдела Ascomycota, среди Basidiomycota встречались только дрожжи, отдел Mucoromycota был представлен двумя видами родов *Mucor* и *Rhizopus*. Следует отметить, что большинство обнаруженных видов – это анаморфы микроспоридий из отдела Ascomycota. Данную группу грибов выделяют в отдел Deuteromycota (несовершенные грибы). По своему происхождению несовершенные грибы связаны с сумчатыми, реже – с базидиальными грибами. Преобладание анаморфных грибов позволяет предположить, что упрощение жизненного цикла ввиду отсутствия телеоморфной стадии дает несовершенным грибам преимущество при колонизации антарктических субстратов в суровых климатических условиях.

Ведущим по числу видов порядком является Eurotiales, представленный видами родов *Aspergillus*, *Penicillium*, далее следуют порядки Nurostreales (включает виды родов *Trichoderma* и *Acremonium*) и Pleosporales (роды *Alternaria* и *Phoma*).

Количество микроспоридий в пробе варьировалось в зависимости от типа субстрата и условий культивирования. Наименьшее количество грибов наблюдалось в пробах каменистых суб-

стратов, где микромицеты находились в составе эндолитного сообщества и наряду с цианобактериями и водорослями развивались в порах и микротрещинах между частицами камней. Количество микромицетов в пробах почв (верхний горизонт, без растительных и животных примесей) варьировалось от 1 до 3. При наличии в почвах примесей в виде остатков мхов, лишайников, гуано или перьев птиц количество микромицетов в отдельной пробе возрастало до 5. Из этого следует, что наличие дополнительных включений благоприятно сказывается на численности и разнообразии грибов ввиду того, что эти примеси являются источником необходимых для жизнедеятельности микромицетов органических веществ.

По результатам исследования самыми распространенными родами микромицетов в восточно-антарктических оазисах являются *Thelebolus*, *Penicillium*, *Acremonium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Pseudogymnoascus*, *Cadophora*, *Rhodotorula*, *Cryptococcus*. Доминирующим по количеству видов являлся род *Penicillium*. Его доля составила 17 % от общего количества видов. Грибы данного рода встречались на всех типах субстрата, но с разной частотой. Наибольшее разнообразие *Penicillium* наблюдалось на антропогенно привнесенных субстратах, а также в почвах без растительных и животных примесей. Примечательно, что род *Penicillium* хоть и превышает остальные роды по разнообразию, но значительно уступает по численности. Некоторые виды данного рода встречались единично.

Как упоминалось выше, по количеству видов доминирующим родом в почвах является *Penicillium*. Однако к доминирующим видам следует отнести аборигенные виды *Thelebolus microsporus*, *Cadophora malorum* и *Pseudogymnoascus pannorum*. Как доминантные виды в почвах, изолированных в местах концентрации птиц, отмечены также *Thelebolus microsporus* и *Pseudogymnoascus pannorum*. Многими авторами описывается высокий адаптивный потенциал этих видов. Они встречаются преимущественно на субстратах естественного происхождения, но в условиях антропогенного загрязнения способны колонизировать привнесенные материалы и переходить к их активной биодеструкции [2].

В орнитогенных субстратах доминировали роды *Aspergillus*, *Thelebolus* и *Pseudogymnoascus*. Два последних рода в нашем исследовании представлены только одним видом, в то время как род *Aspergillus* насчитывает 6 видов. Значительно реже из данного типа субстратов выделяли грибы родов *Chaetomium* и *Penicillium*. Следует отметить, что большинство микромицетов, выделенных из орнитогенных субстратов, зарегистрированы и в почвах без примесей.

Для растительных субстратов высока доля родов *Trichoderma*, *Phoma* и *Penicillium*. Как упоминалось выше, растительный покров способствует возрастанию разнообразия и численности грибов. Наиболее характерно это для грибов рода *Penicillium*. Для данного типа субстрата зафиксированы 6 из 8 выделенных грибов рода *Penicillium*.

В рамках работы был исследован керн донных отложений оз. Нижнее (оазис Холмы Тала, станция «Гора Вечерняя»). Длина керна составляет 195 см. По мере возрастания глубины уменьшалось количество мицелиальных грибов и увеличивалось количество дрожжей. Верхний слой керна (0–45 см) характеризовался преобладанием грибов рода *Penicillium*. На глубине 65–115 см наблюдалось наибольшее разнообразие микромицетов: были выделены грибы родов *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Penicillium*. Из нижних слоев керна выделялись преимущественно дрожжи (табл. 4).

Из антропогенно привнесенных проб субстратов, включающих лоскуты ткани и этикетки от пищевых продуктов, были выделены виды родов *Alternaria*, *Aspergillus*, *Penicillium* и *Cadophora*. Следует отметить, что для данного типа субстрата характерно преобладание темнопигментированных грибов.

В результате исследования не выявлено микромицетов, строго специфичных для определенного местообитания. Существуют виды, типичные для какого-либо субстрата, однако они встречаются и на других типах субстрата, но с разной частотой. Так, например, микромицеты из рода *Chaetomium* встречались на растительных субстратах и почвах без примесей, а также были выделены из керна и субстратов животного происхождения (рис. 5).

Таблица 4. Микромикеты, выделенные из керн донных отложений оз. Нижнее

Table 4. Micromycetes isolated from the bottom sediment core of Lake Nizhnee

Микромикет	Глубина сбора, см
<i>Aspergillus sp.</i>	90–95
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze	110–115
<i>Chaetomium megalocarpum</i> Bainier	80–85
<i>Cladosporium sphaerospermum</i> Penz.*	150–155
<i>Cystobasidium laryngis</i> (Reiersöl) Yurkov, Kachalkin, H. M. Daniel, M. Groenew., Libkind, V. de Garcia, Zalar, Gouliam., Boekhout & Begerow*	135–140, 180–185
<i>Naganishia diffluens</i> (Zach) Xin Zhan Liu, F.Y. Bai, M. Groenew. & Boekhout, in Liu, Wang, Göker, Groenewald, Kachalkin, Lumbsch, Millanes, Wedin, Yurkov, Boekhout & Bai*	0–5, 85–90, 95–100, 155–160, 170–175, 180–185, 185–190
<i>Penicillium chrysogenum</i> Thom*	0–5, 5–10, 20–25
<i>Penicillium sp.</i>	0–5, 5–10, 20–25, 30–35, 50–55, 60–65, 85–90, 95–100, 135–140
<i>Talaromyces purpureogenus</i> Samson, N. Yilmaz, Houbraken, Spierenb., Seifert, Peterson, Varga & Frisvad*	130–135

Рис. 5. Микромикеты рода *Chaetomium* на различных субстратах (перья птиц, керн донных отложений)Fig. 5. Micromycetes of the genus *Chaetomium* on various substrates (bird feathers, bottom sediment core)

Проанализированы температурозависимые особенности роста выделенных микромикетов. По отношению к низким температурам выделяют следующие группы микромикетов:

1) мезофильные, с температурными границами роста от +10 до +38 °С (оптимальная температура – +25–30 °С). К данной группе относятся микромикеты родов *Penicillium*, *Fusarium*;

2) психрофильные, температурный диапазон роста которых составляет –3...+10–20 °С. Оптимальными температурами для данных организмов являются +5–10 °С. Например, фитопатоген хвойных растений в Альпах *Herpotrichia juniperi* (Sacc.) Petr.;

3) психротолерантные (психротрофные) микромикеты, для которых оптимальными являются низкие температуры, однако, в отличие от психрофильных, они способны расти при температуре +20 °С и выше. К таковым относятся некоторые виды рода *Cladosporium*, а также антарктический доминант *Geomyces pannorum* [2].

Большинство выделенных микромикетов могут быть отнесены к психрофильным и психротрофным, доля мезофильных видов составила менее 20 %.

Заключение. Благодаря широкому спектру защитных реакций антарктические микромицеты представляют собой прекрасную модель для исследования закономерностей адаптации эукариотических организмов к экстремальным факторам среды (экстремально низкие значения температур, гиперсоленость, высокий уровень ультрафиолетового излучения, крайние значения pH, недостаток источников питания, нехватка кислорода, высушивание, воздействие токсических веществ и др.).

Отличительной особенностью микобиоты Антарктиды является преобладание микромицетов отдела Ascomycota. Кроме того, большинство обнаруженных грибов данного отдела – это микромицеты с конидиальным спороношением. Для комплексов антарктических микромицетов характерно явление монодоминантности, т. е. преобладания одного или двух видов грибов. Это может свидетельствовать о том, что экосистемы Антарктиды имеют простую структуру с короткими пищевыми цепями. Большинство обнаруженных видов микромицетов являются космополитными.

В результате исследования не выявлено субстратной приуроченности у выделенных микромицетов. Количество видов в отдельной пробе варьировалось от 1 до 5 в зависимости от типа субстрата. Растительный покров, представленный мхами, лишайниками и цианобактериальными матами, а также животные включения в виде перьев, костей, гуано птиц положительно влияют на численность и разнообразие микромицетов. Наименьшее разнообразие грибов отмечено для каменистых субстратов.

Доминирующими родами в изученных биотопах Восточной Антарктиды являются *Thelebolus*, *Penicillium*, *Acremonium*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Pseudogymnoascus*, *Cadophora*, *Rhodotorula*, *Cryptococcus*. Преобладающим по количеству видов родом является *Penicillium* (17 % от общего количества видов).

Следует отметить возросшее влияние антропогенных факторов на развитие микобиоты материка. В первую очередь это выражается в заносе космополитных видов, способных адаптироваться к суровым антарктическим условиям, а также в появлении антропогенно привнесенных субстратов. Доминирующие аборигенные роды микромицетов, имеющие высокий адаптивный потенциал, обычно колонизируют субстраты естественного происхождения, но способны переходить к биодеструкции субстратов антропогенного происхождения.

Чистые культуры микромицетов и пробы субстратов хранятся в микологическом гербарии Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси.

Список использованных источников

1. Rosa, L. H. *Fungi of Antarctica: Diversity, Ecology and Biotechnological Applications* / L. H. Rosa. – Switzerland : Springer Publ., 2019. – 345 p.
2. Кирцидели, И. Ю. Почвообитающие микроскопические грибы в экосистемах Арктики и Антарктики : дис. ... д-ра биол. наук : 03.02.12 / И. Ю. Кирцидели. – СПб., 2019. – 459 с.
3. Лысак, В. В. *Микробиология. Практикум: пособие* / В. В. Лысак. – Минск : Изд-во БГУ, 2015. – 113 с.
4. Basic searching on Mycobank. – Mode of access: <https://www.mycobank.org/page/Basic%20names%20search/>. – Date of access: 27.06.2022.
5. Бабьева, И. П. *Биология дрожжей* / И. П. Бабьева. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 239 с.
6. Литвинов, М. А. *Определитель микроскопических почвенных грибов* / М. А. Литвинов. – СПб. : Наука, 1967. – 297 с.
7. Domsch, K. H. *Compendium of soil fungi* / K. H. Domsch, W. Gams, T.-H. Anderson. – 2nd ed. – Eching : IHW-Verl., 2007. – 672 p.

References

1. Rosa L. H. *Fungi of Antarctica: Diversity, Ecology and Biotechnological Applications*. Switzerland, Springer Publishing, 2019. 345 p.
2. Kirtsideli I. Yu. *Soil-dwelling microscopic fungi in the ecosystems of the Arctic and Antarctic*. Ph. D. Thesis. St. Petersburg, 2019. 459 p. (in Russian).
3. Lysak V. V. *Microbiology. Workshop: manual*. Minsk, Belarusian State University, 2015. 113 p. (in Russian).
4. *Basic searching on Mycobank*. Available at: <https://www.mycobank.org/page/Basic%20names%20search/> (accessed 27.06.2022).
5. Bab`eva I. P. *Biology of yeasts*. Moscow, Moscow State University Publishing House, 2004. 239 p. (in Russian).
6. Litvinov M. A. *Key to microscopic soil fungi*. St. Petersburg, Nauka Publ., 1967. 297 p. (in Russian).
7. Domsch K. H., Gams W., Anderson T.-H. *Compendium of soil fungi. 2nd ed.* Eching, IHW-Verlag, 2007. 672 p.

Информация об авторах

Карманова Вероника Вадимовна – магистр, мл. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: veronikarmanova@gmail.com

Шабашова Татьяна Гарьевна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tiniti@inbox.ru

Гигиняк Юрий Григорьевич – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: antarctida_2010@mail.ru

Синявская Марина Георгиевна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Институт генетики и цитологии НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.sin@inbox.ru

Information about the authors

Veronika V. Karmanova – Master, Junior Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: veronikarmanova@gmail.com

Tatyana G. Shabashova – Ph. D. (Biol.), Head of the Laboratory. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tiniti@inbox.ru

Yury G. Hihiniak – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: antarctida_2010@mail.ru

Marina G. Sinyavskaya – Ph. D. (Biol.), Head of the Laboratory. Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.sin@inbox.ru