

Кирцидели И.Ю.¹, Власов Д.Ю.^{1,2}, Зеленская М.С.², Ильюшин В.А.¹, Новожилов Ю.К.¹, Чуркина И.В.³, Баранцевич Е.П.³

Оценка антропогенной инвазии микроскопических грибов в арктические экосистемы (архипелаг Шпицберген)

¹ФГБУН Ботанический институт имени В.Л. Комарова Российской академии наук, 197376, Санкт-Петербург;

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», 199034, Санкт-Петербург;

³Северо-Западный федеральный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 197341, Санкт-Петербург

Введение. Изменение микробных сообществ в полярных регионах является отражением происходящих климатических изменений и может служить одним из показателей состояния арктических экосистем. Целью данной работы было изучение микобиоты, развивающейся на антропогенных материалах, в почве и воздушной среде в пос. Баренцбург (архипелаг Шпицберген), для оценки распространения инвазивных видов и выявления условно патогенных микромицетов.

Материал и методы. Материал для исследования был собран в период 2017–2018 гг. в ходе выполнения научно-исследовательских работ российской арктической экспедиции ААНИИ в районе пос. Баренцбург (расположенном на 78° с.ш, 14° в.д.) на арх. Шпицберген. Выделение микромицетов проводилось стандартными микробиологическими методами. Идентификацию микромицетов проводили по культурально-морфологическим признакам и по результатам секвенирования изолятов по регионам ITS1 и ITS2.

Результаты. В результате исследований установлен высокий уровень биологической колонизации антропогенных субстратов, выявлены места накопления условно патогенных микроорганизмов. Было идентифицировано 24 вида микромицетов из образцов антропогенных материалов, 46 видов из аэромикоты и 43 вида из почв региона. Доминирующим по числу видов оказался род *Penicillium* (12 видов), за которым следуют *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Cadophora* (по 3 вида). Антропогенное воздействие приводит к изменению видового состава, структуры и других характеристик комплексов микроскопических грибов на материалах, в аэромикоте и почвах арктических территорий. Для нарушенных экосистем установлено: 1) изменение структуры комплексов микромицетов и увеличение численности микроскопических грибов в аэромикоте и почве, 2) формирование аэромикоты происходит частично за счёт интродуцированных видов, 3) доминирование тёмноокрашенных грибов на антропогенных материалах, 4) среди микромицетов-интродуцентов значительную долю составили виды, являющиеся условными патогенами человека, 5) интродуцированные виды способны адаптироваться к арктическим условиям.

Заключение. На примере пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) показано, что антропогенное воздействие приводит к изменению основных характеристик комплексов микроскопических грибов арктических территорий.

К л ю ч е в ы е с л о в а : микобиота; микробные сообщества; Арктика; антропогенное влияние; антропогенные субстраты; почва; аэромикота.

Для цитирования: Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Зеленская М.С., Ильюшин В.А., Новожилов Ю.К., Чуркина И.В., Баранцевич Е.П. Оценка антропогенной инвазии микроскопических грибов в арктические экосистемы (архипелаг Шпицберген). *Гигиена и санитария*. 2020; 99 (2): 145-151. DOI: <http://dx.doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-2-145-151>

Для корреспонденции: Кирцидели Ирина Юрьевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории отдела микологии Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН, 197376, Санкт-Петербург. E-mail: microfungi@mail.ru

Благодарность. Благодарим ААНИИ за организацию и финансирование экспедиционных работ и лично Угрюмова Ю.В. за помощь и сотрудничество.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследования частично выполнялись в рамках гос. задания, согласно тематическому плану Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН по теме «Биоразнообразие, экология и структурно-функциональные особенности грибов и грибообразных протистов» (присвоен регистрационный номер АААА-А19-119020890079-6, дата регистрации НИОКТР 08/02/2019), а также программе фундаментальных исследований Президиума РАН. Работа выполнена при поддержке СПбГУ (Мероприятие 1. Проект «Урбанизированные экосистемы Арктического пояса Российской Федерации: динамика, состояние и устойчивое развитие»). Было использовано оборудование центра коллективного пользования научным оборудованием «Клеточные и молекулярные технологии изучения растений и грибов» Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН и «Развитие клеточных и молекулярных технологий СПбГУ».

Участие авторов: концепция и дизайн исследования – Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Баранцевич Е.П.; сбор материала – Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю.; обработка материала и культурально-морфологическая идентификация видов – Кирцидели И.Ю., Зеленская М.С.; молекулярная идентификация видов – Чуркина И.В., Баранцевич Е.П.; сканирующая микроскопия – Зеленская М.С.; статистическая обработка и определение интегральных показателей (в том числе прямое микроскопирование и определение биомассы) – Новожилов Ю.К., Ильюшин В.А.; написание текста – Кирцидели И.Ю.; редактирование – Власов Д.Ю., Новожилов Ю.К.

Поступила: 28.02.19
Принята к печати: 12.12.19
Опубликована: 23.03.2020

Kirtsideli I.Yu.¹, Vlasov D.Yu.^{1,2}, Zelenskaya M.S.², Iliushin V.A.¹, Novozhilov Yu.K.¹, Churkina I.V.³, Barantsevich E.P.³**Assessment of anthropogenic invasion of microfungi in Arctic ecosystems (exemplified by Spitsbergen archipelago)**¹Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 197376, Russian Federation;²Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russian Federation;³North-Western Almazov Federal Medical Research Center of the Russian Federation, St. Petersburg, 197341, Russian Federation

Introduction. The aim of this work was to study the mycobiota of anthropogenic materials, soil and air in the settlement Barentsburg (Spitsbergen archipelago), to assess the spread of invasive species and to identify potentially pathogenic microfungi.

Material and methods. The material for the study was collected in the period of research work of the Russian expedition of the AARI (2017-2018) in the area of the settlement Barentsburg (located at 78° N, 14° E). Isolation and identification of microfungi were carried out using standard microbiological methods according to cultural and morphological characteristics and sequencing in the ITS1 and ITS2 regions.

Results. As a result of the research, a high level of microbiological colonization of anthropogenic substrates has been established, the places of accumulation of potentially pathogenic microorganisms were found out. 24 species of microfungi were identified from anthropogenic materials, 46 and 43 species from aeromycota and the soils of the observed territory. The genus *Penicillium* (12 species) prevailed by the number of species, followed by *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Cadophora* (3 species each). For disturbed ecosystems the following peculiarities have been established: 1) a change in the structure of microfungi complexes and increase in the CFU number of microfungi at aeromycota and soil, 2) aeromycota formation occurs partly due to introduced species, 3) a clear dominance of dark-colored fungi on anthropogenic materials, 4) among the introduced microfungi a significant proportion were destructors of the materials as well as potentially human pathogens; 5) introduced species are able to adapt to arctic conditions.

Conclusion. On the example of the village of Barentsburg (arch. Svalbard) it is shown that anthropogenic impact leads to changes in the main characteristics of microscopic fungi complexes in the Arctic territories.

Key words: microbial communities; mycobiota; Arctic; anthropogenic influence; anthropogenic substrates; soil; aeromycota.

For citation: Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Zelenskaya M.S., Iliushin V.A., Novozhilov Yu.K., Churkina I.V., Barantsevich E.P. Assessment of anthropogenic invasion of microfungi in Arctic ecosystems (exemplified by Spitsbergen archipelago). *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(2): 145-151. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-2-145-151>

For correspondence: Irina Yu. Kirtsideli, MD, Ph.D., DSci., leading researcher of the Mycology department of V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, 197376, Russian Federation. E-mail: microfungi@mail.ru

Information about authors:

Kirtsideli I.Yu., <http://orcid.org/0000-0002-4736-2485>; Vlasov D.Yu., <http://orcid.org/0000-0002-0455-1462>; Zelenskaya M.S., <http://orcid.org/0000-0003-3588-8583>; Iliushin V.A., <https://orcid.org/0000-0003-1031-7661>; Novozhilov Yu.K., <http://orcid.org/0000-0001-8875-2263>; Churkina I.V., <http://orcid.org/0000-0002-9259-7152>; Barantsevich E.P., <http://orcid.org/0000-0002-4800-3345>

Gratitude. Authors thank the State Research Center "Arctic and Antarctic Research Institute" for the organization and financing of expeditionary work and personally Ugrumova Yu.V. for help and cooperation.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. The studies were partially carried out in the framework of the state tasks according to the thematic plan of the V.L. Komarov Botanical Institute RAS on the topic "Biodiversity, ecology and structural and functional features of fungi and mushroom-like protists" (assigned registration number AAAA-A19-119020890079-6, registration date R&D 08/02/2019), as well as the basic research program of the Presidium of the RAS. This work was supported by St. Petersburg State University (Activity 1. Project "Urban Ecosystems of the Arctic Belt of the Russian Federation: Dynamics, State, and Sustainable Development"). The equipment of the center for the collective use of scientific equipment "Cellular and molecular technologies for the study of plants and mushrooms" was used at the V.L. Komarov Botanical Institute, RAS and "Development of cellular and molecular technologies of St. Petersburg State University."

Contribution: The concept and design of the study – Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Barantsevich E.P.; Collection of material – Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu.; Material processing and cultural–morphological identification of species – Kirtsideli I.Yu., Zelenskaya M.S.; Molecular identification of species – Churkina I.V., Barantsevich E.P.; Scanning microscopy – Zelenskaya M.S.; Statistical processing and determination of integral indices (including direct microscopy and determination of biomass) – Novozhilov Yu.K., Ilyushin V.A.; Writing of the text – Kirtsideli I.Yu.; Editing – Vlasov D.Yu., Novozhilov Yu.K.

Received: March, 2019

Accepted: December 12, 2019

Published: March 23, 2020

Введение

Окружающая среда Арктики претерпевает значительные изменения, обусловленные климатическими процессами, а также растущим антропогенным загрязнением [1–3]. Международными экспертами признано, что изменение микробных сообществ в полярных регионах является отражением происходящих климатических изменений и может служить одним из показателей состояния арктических экосистем. Кроме того, структура микробиоты является надёжным показателем антропогенного влияния на природные экосистемы [4]. В условиях высоких широт микробные сообщества способны оказывать заметное влияние на среду обитания человека. Очевидно, что те факторы внешней среды, которые имеют незначительное воздействие на человека в средних широтах, могут быть гораздо более значимыми в экстре-

мальных условиях Арктики [5–7], что связано прежде всего с ослаблением иммунитета у людей, длительное время проживающих и работающих в высоких широтах. К числу таких факторов следует отнести накопление условно патогенных и патогенных для человека микроорганизмов [8]. Расселение в арктических экосистемах инвазивных видов способно изменить структуру микробных сообществ в почвах Арктики и Антарктики [9]. Инвазивные виды, способные к существованию в широком диапазоне температур, достаточно быстро адаптируются к условиям Арктики, не сталкиваясь при этом с серьёзным антагонизмом со стороны аборигенных видов [10, 11]. В свою очередь аборигенные виды способны постепенно осваивать новые субстраты (привнесённые человеком в арктические экосистемы), адаптироваться к среде обитания человека и могут рассматриваться как потенциальные патогены [12, 13].

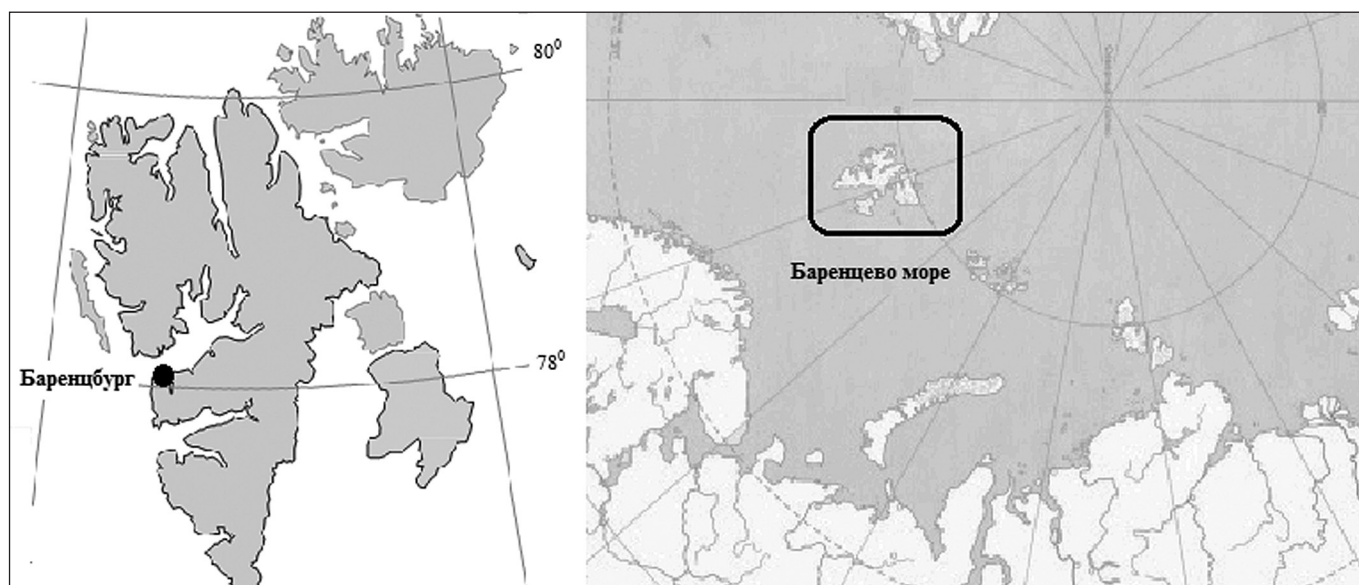


Рис. 1. Область исследования.

Целью данной работы было изучение микобиоты, развивающейся на антропогенных материалах, в почве и воздушной среде в пос. Баренцбург (архипелаг Шпицберген), для оценки распространения инвазивных видов и выявления условно патогенных микромицетов.

Материал и методы

Материал для исследования был собран в период 2017–2018 гг. в ходе экспедиции, организованной Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом.

Шпицберген – обширный полярный архипелаг, расположенный в Северном Ледовитом океане, между $76^{\circ}26'$ и $80^{\circ}50'$ северной широты и 10° и 32° восточной долготы (рис. 1). Посёлок Баренцбург – второй по величине населённый пункт на архипелаге Шпицберген. Располагаясь на территории Норвегии, Баренцбург имеет также и Генеральное консульство РФ. Климат арктический, на западе значительно смягчён тёплым течением (часть Гольфстрима). Средняя температура воздуха июля на побережье от $+4$ до $+6^{\circ}\text{C}$. Около 60% поверхности покрыто ледниками [14]. Из-за влияния Гольфстрима зимние температуры на Шпицбергене в среднем выше, чем в прочих местах сравнимой широты.

Были исследованы материалы антропогенного происхождения, находящиеся как вне помещений, так и внутри заброшенных помещений (длительное время здания не использовались и не отапливались, и температура в них соответствовала внешней среде). Образцы материалов помещали в стерильные ёмкости, а выделение микроскопических грибов проводилось в лабораторных условиях прямым посевом мелких фрагментов на питательную среду. Кроме того, использовали смывы с материалов, для чего образцы помещали в колбы со стерильной водой, встряхивали в течение 20 мин, после чего 1 мл полученной суспензии переносили на питательные среды.

Отбор микробиологических проб воздушной среды в жилых и рабочих помещениях, на территории станции и на контрольных участках осуществляли при помощи аспиратора ПУ-1Б (сертифицированное в России пробоотборное устройство для взятия проб воздуха), через который прокачивали воздух в объёме 250–1000 л, осаждая микроорганизмы в чашки Петри на питательную среду. При взятии пробы прибор располагали на уровне около 1 м от поверхности. Каждая проба отбиралась в трёхкратной повторности на агаризованные питательные среды Чапека, Сабуро и мясо-пептонный агар (МПА). В лабораторных

условиях чашки инкубировали при температуре $+5$, $+15$ и $+25^{\circ}\text{C}$, подсчитывали количество выросших колоний и производили пересчёт колониобразующих единиц (КОЕ) на 1 м^3 воздуха (в соответствии с руководством по эксплуатации прибора ПУ-1Б). После этого осуществляли отсев чистых культур микромицетов для идентификации. Часть штаммов доминирующих видов проверяли на способность к росту при температуре $+37^{\circ}\text{C}$ (признак потенциальной патогенности в отношении человека).

Образцы почв были отобраны на территории посёлка, а также на контрольных участках, которые представляли собой зональные тундры за пределами посёлка (на значительном удалении). Пробы отбирались с соблюдением стерильности. Выделение микроорганизмов из почв и грунтов проводилось стандартными методами посева на агаризованные питательные среды. Численность грибов подсчитывали на среде Чапека и Сабуро, а бактерий – на среде МПА [15].

Определение микромицетов проводили на основе культурально-морфологических признаков по определителям российских и зарубежных авторов. В отдельных случаях были использованы молекулярные методы (как правило, для идентификации дрожжей и стерильного мицелия). Образцы ДНК исследуемых грибов секвенировали по регионам *ITS1* и *ITS2*. Полученные нуклеотидные последовательности сравнивали при помощи программы BLAST с нуклеотидными последовательностями, имеющимися в открытой базе данных на сайте NCBI [16]. Названия и положение таксонов унифицировали с использованием базы данных CBS (www.indexfungorum.org/Names/fungi.asp).

Определение биомассы микроорганизмов в почве проводилось методом люминесцентной микроскопии. Применяли несколько модифицированный метод Звягинцева [15], а в качестве люминесцентного красителя был выбран солофенил. Его использование даёт более надёжные и показательные результаты по сравнению с традиционно применяемым в подобных методиках красителем калькофлором [17]. Учёт грибных пропагул осуществляли при просмотре препаратов в люминесцентном микроскопе Zeiss Axioskop (Германия) при увеличении 10×40 . При расчёте грибной биомассы (мг/г почвы) считали, что плотность спор равна $0,837\text{ г/см}^3$, а плотность мицелия – $0,628\text{ г/см}^3$ [18]. Статистическую обработку данных проводили с использованием программ Microsoft Office Excel 2003 и Statistica 8.0.

Исследования образцов повреждённых материалов с использованием сканирующей электронной микроскопии проводили на сканирующем электронном микроскопе-микроанализаторе TM 3000 (НИТАСН, Япония, 2010).

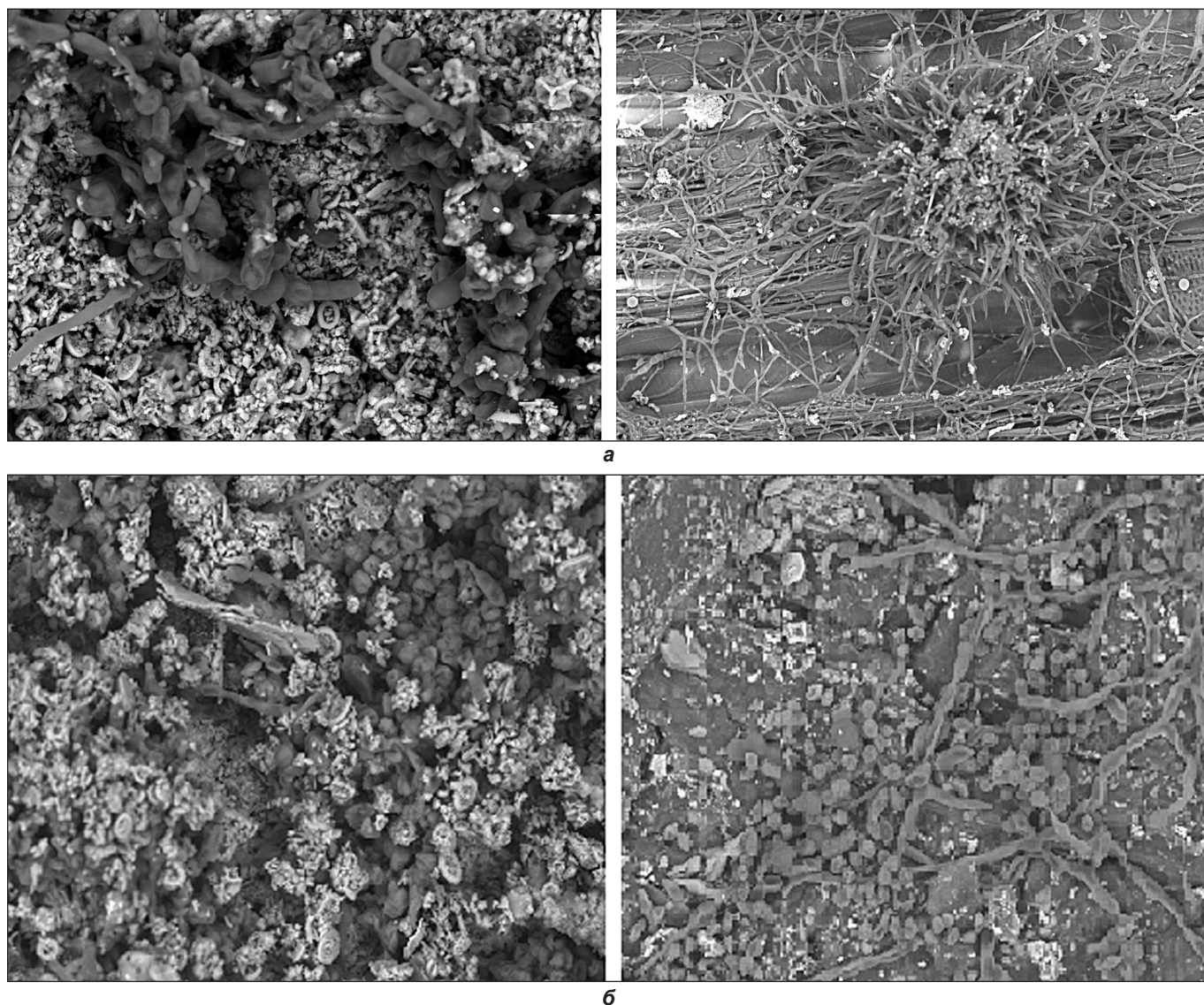


Рис. 2. Развитие микроскопических грибов на поверхности антропогенных материалов: а – фанера; б – штукатурное покрытие.

Расчёт индекса микологической опасности проводили по формуле:

$$Im = D \cdot C,$$

где D – изменение разнообразия (числа видов потенциально патогенных видов грибов по сравнению с контролем); C – изменения обилия потенциально патогенных видов грибов по сравнению с контролем. Значение $Im \geq 4$ рассматривается как ситуация микологической опасности [4].

Результаты

В результате исследований установлен высокий уровень микробиологической колонизации антропогенных субстратов, выявлены места накопления условно патогенных микроорганизмов. Они приходятся главным образом на заброшенные деревянные постройки, эксплуатация которых прекращена десятки лет назад. Облицовочные материалы в них несут следы биоповреждений, местами наблюдается открытый рост колоний плесневых грибов на отделочных материалах внутри помещений и на облицовке фасада. В результате микологического анализа образцов антропогенных материалов идентифицировано 24 вида микромицетов. Доминирующим по числу видов оказался

род *Penicillium* (7 видов), за которым следуют *Cladosporium* и *Aspergillus* (по 3 вида). Виды родов *Alternaria*, *Aureobasidium*, *Chaetomium*, *Pseudogymnoascus*, *Coniosporium*, *Papulospora*, *Phoma*, *Polyscytalum*, *Scytalidium*, *Stachybotrys*, *Ulocladium* сохранили по 1 виду.

Применение сканирующей электронной микроскопии (рис. 2) показало, что данные виды активно развиваются на поверхности материалов. На отдельных участках поверхностный налёт грибов развивается сплошным слоем, а материал оказывается сильно повреждён. Учитывая адаптационный потенциал этих грибов, можно предположить, что отмеченные микромицеты могут переходить к существованию на сходных по составу субстратах (например, целлюлозосодержащих) природного происхождения.

Аэромикота арктических территорий крайне бедна [19–23]. Отмечено увеличение численности микроскопических грибов и бактерий в воздушной среде помещений по сравнению с природными ландшафтами. Особенно высокую численность микроскопических грибов отмечали в заброшенных домах. Возможно, это связано с микологическим поражением целлюлозосодержащих материалов. Различия в численности микроскопических грибов на территории станций (во внутренней и внешней среде) можно рассматривать как существенные, по крайней мере в летние месяцы (табл. 1).

Таблица 1

Численность микроскопических грибов и бактерий в воздушной среде в районе пос. Баренцбург (КОЕ/м³)

Группа микроорганизмов	Природные ландшафты	Территория посёлка	Внутренняя среда помещений
Микроскопические грибы	28 ± 7	290 ± 35	195 ± 12
Бактерии	30 ± 4	250 ± 24	180 ± 15

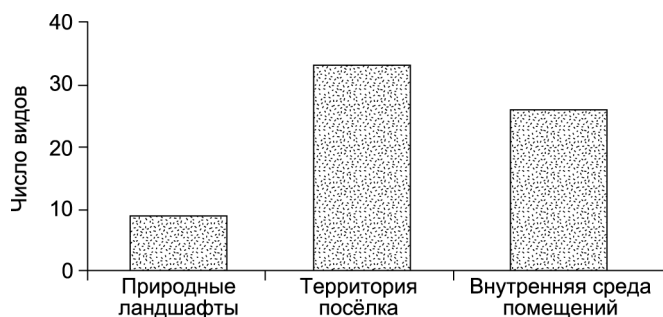


Рис. 3. Число видов микроскопических грибов в воздушной среде в районе пос. Баренцбург.

В воздушной среде арктических поселений на архипелаге Шпицберген всего выделено 46 видов микроскопических грибов. Из них 8 видов выявлено в естественных ландшафтах, 32 – на территории посёлка Баренцбург, а 25 – в помещениях (рис. 3).

Исследования микобиоты арктических почв проводилось на Шпицбергене в разные годы [24–28], однако данные исследования не затрагивали изменения комплексов микроорганизмов при антропогенном загрязнении. В наших исследованиях показано, что при антропогенном загрязнении почв в районе пос. Баренцбург наблюдается изменение структуры комплексов микромицетов (табл. 2). Численность микроскопических грибов в антропогенно загрязнённых почвах резко увеличивалась. Одновременно происходило увеличение доли спор и уменьшение доли мицелия по сравнению с контрольными почвами, что может быть связано с изменением активности ряда видов. При орнитогенном загрязнении почв на территории посёлка, сопровождающемся повышением содержания в них органического вещества [29, 30], наблюдалось резкое увеличение численности КОЕ микромицетов. Суммарная биомасса спор и мицелия варьировала от 6,983 (в контрольных почвах) до 35,832 мг/г (в антропогенно загрязнённых почвах в местах скопления птиц).

Обсуждение

На антропогенных субстратах более трети всех выявленных видов составили тёмноокрашенные микромицеты, наиболее хорошо адаптированные к обитанию в условиях высоких широт. К явным доминантам в изученных местообитаниях относятся грибы рода *Cladosporium*, которые выявлены в большинстве изученных проб. Особенно активно эти грибы развивались на фанере, картоне, штукатурном и красочном покрытии. Следует

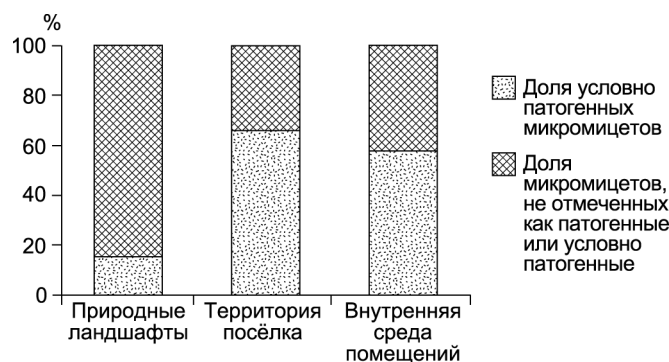


Рис. 4. Доля условно патогенных микроскопических грибов в аэромикоте пос. Баренцбург.

отметить, что в наиболее влажных участках заброшенных построек грибы формировали сплошные поверхностные налёты. Особенно хорошо они были заметны на древесине. Преобладающими видами на антропогенных субстратах оказались известные деструкторы материалов, отмечавшиеся нами ранее в различных экологических условиях. Возможно, эти виды могли быть привнесены в арктические экосистемы вместе с антропогенными материалами.

Важно отметить, что более половины видового списка составили условно патогенные грибы. Среди них есть виды, которые отличаются высокой токсигенностью. Они способны стать причиной ухудшения состояния здоровья полярников.

В целом полученные данные свидетельствуют о накоплении микромицетов (в том числе условно патогенных) в заброшенных постройках.

При исследовании аэромикоты показано, что её формирование на территории посёлка происходит как за счёт микобиоты естественных арктических ландшафтов, так и за счёт инвазивных видов, появление и накопление которых связано с деятельностью человека. Практически все виды, отмеченные на антропогенных материалах, отмечались и в аэромикоте посёлка.

Доминирующим по числу видов в аэромикоте оказался род *Penicillium* (10 видов). В их число вошли все виды, отмеченные на антропогенных материалах, а также виды, характерные для арктических почв, – *Penicillium lanosum*, *P. glabrum*, *P. chrysogenum* [31–34]. В воздушной среде выявлены представители родов *Acremonium*, *Exophiala*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Paecilomyces*, *Verticillium*, *Trichoderma*, *Oidiodendron*, *Cadophora*, *Rhodotorula* и др. Более 60% видов микроскопических грибов, выявленных в аэромикоте антропогенных местообитаний, являются условно патогенными [35] (рис. 4). Полученные данные указывают на необходимость контроля численности и видового состава микроскопических грибов арктических поселений.

Под влиянием антропогенного фактора отмечено заметное изменение видового состава микроскопических грибов в почвах на изученной территории. Всего в почвах было выявлено и идентифицировано 43 вида. Из них в антропогенно загрязнённых почвах – 35 видов, в контрольных почвах – 15 видов. Общими оказались 7 видов микромицетов (16% от общего числа выявленных грибов в почвах). Некоторые изоляты родов *Alternaria*, *Aspergillus*, *Emericella*, *Sarocladium*, *Trichoderma*, *Ulocladium*

Таблица 2

Основные характеристики комплексов почвенных микроскопических грибов в районе пос. Баренцбург

Место отбора почвенных проб	Численность микроскопических грибов, КОЕ/г		Доля спор / мицелия, %	Суммарная биомасса спор и мицелия, мг/г почвы
	посев на питательные среды	прямой подсчёт		
Контрольные почвы	32,1 · 10 ³ ± 2,9 · 10 ³	8,7 · 10 ⁶ ± 0,9 · 10 ⁶	76 / 24	6,983 ± 0,943
Антропогенно загрязнённые почвы	124,8 · 10 ³ ± 13,6 · 10 ³	2,67 · 10 ⁷ ± 0,3 · 10 ⁷	99 / 1	28,811 ± 3,221
Антропогенно загрязнённые почвы в местах скопления птиц	212,2 · 10 ³ ± 20,3 · 10 ³	4,53 · 10 ⁷ ± 0,4 · 10 ⁷	78 / 22	35,832 ± 3,815

были выделены в культуру только при температуре +25 °С. По-видимому, эти микромицеты попадали в почву в результате антропогенной инвазии. При низких температурах они могли сохраняться в покоящихся формах. Следует отметить, что часть изолятов упомянутых родов была способна развиваться в культуре при +5 °С. Не исключено, что многие из этих штаммов являются психротолерантами или мезофилами с очень широкой амплитудой роста. Преобладание психротолерантов над психрофилами в полярных регионах отмечалось ранее рядом авторов [12, 32, 33].

В целом полученные данные свидетельствуют о значительном сходстве видового состава антропогенно загрязнённых почв и антропогенных субстратов. В изученных почвах на территории пос. Баренцбург встречаются как аборигенные, так и инвазивные виды. Стоит отметить, что на загрязнённых территориях наблюдается увеличение числа условно патогенных микроскопических грибов. Расчёт индексов микологической опасности (Im) для комплексов микромицетов антропогенно загрязнённых почв составлял более 7. Результаты исследований свидетельствуют о присутствии, накоплении и адаптации к условиям Арктики потенциально патогенных микроскопических грибов на загрязнённых территориях. Результаты данной работы показывают, что постоянный мониторинг микробиологических показателей на

территории поселений в арктической зоне будет способствовать сохранению и устранению возможных последствий для здоровья полярников.

Заключение

На примере пос. Баренцбург (арх. Шпицберген) показано, что антропогенное воздействие приводит к изменению основных характеристик комплексов микроскопических грибов арктических территорий. Для антропогенно загрязнённых территорий показано:

- 1) увеличение численности микроскопических грибов в аэромикоте и почве;
- 2) явное доминирование тёмноокрашенных грибов на антропогенных материалах;
- 3) возрастание доли инвазивных видов, способных адаптироваться к условиям Арктики;
- 4) значительная доля биодеструкторов материалов и условных патогенов человека.

Полученные данные свидетельствуют о том, что основные характеристики комплексов микромицетов могут служить индикаторами изменений арктических экосистем при антропогенном воздействии.

Литература (пп. 1–3, 5–7, 9–14, 17–19, 23–25, 27–31, 33, 34 см. References)

4. Марфенина О.Е. Антропогенное изменение комплексов микроскопических грибов в почвах. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.; 1999.
8. Зачиняева А.В., Лебедева Е.В. Микромицеты загрязнённых почв Северо-Западного региона России и их роль в патогенезе аллергических форм микозов. *Микология и фитопатология*. 2003; 37 (5): 69–74.
15. Звягинцев Д.Г. *Методы почвенной микробиологии и биохимии*. М.: Издательство Московского университета; 1991. 304 с.
16. Пестова Н.Е., Баранцевич Е.П., Рыбкова Н.С., Козлова Н.С., Баранцевич Н.Е. Изучение эффективности применения метода секвенирования ДНК по фрагменту гена 16S РРНК для идентификации микроорганизмов. *Профилактическая и клиническая медицина*. 2011; 4 (41): 54–5.
20. Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Крыленков В.А., Соколов В.Т. Аэромикота в районах расположения арктических станций России в акваториях Белого, Баренцева и Карского морей. *Микология и фитопатология*. 2011; 45 (3): 228–39.
21. Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Крыленков В.А., Ролле Н.Н., Баранцевич Е.П., Соколов В.Т. Сравнительное исследование аэромикоты арктических станций по Северному морскому пути. *Экология человека*. 2018; 4: 16–21.
22. Кирцидели И.Ю. Почвенные микромицеты арктических тундр таймырского побережья Карского моря. *Микология и фитопатология*. 1999; 33 (1): 19–24.
26. Матвеева Н.В., Заноха Л.Л., Афонина О.М., Потемкин А.Д., Патова Е.Н., Давыдов Д.А. и соавт. *Растения и грибы полярных пустынь Северного полушария*. Российская академия наук, Ботанический институт им. В.Л. Комарова. СПб.: Марафон; 2015.
32. Кочкина Г.А., Иванушкина Н.Е., Озерская С.М. Структура микобиоты многолетней мерзлоты. *Микология сегодня*. 2011; 2: 178–84.
35. Санитарные правила СП 1.3.2322-08. Безопасность работы с микроорганизмами III–IV групп патогенности (опасности) и возбудителями паразитарных инфекций.

References

1. AMAP Arctic pollution 2006. Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme; 2006.
2. Christensen J.H., Hewitson B., Busiuc A., Chen A., Gao X., Held I. et al. Regional climate projections. In: Solomon S. et al (eds). *Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2007: 849–940.
3. Henry H.A.L. Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes. *Climatic Change*. 2008; 87: 421–34.
4. Марфенина О.Е. *Antropogenic changes in complexes of microfungi in soils [Antropogennoye izmeneniye kompleksov mikroskopicheskikh gribov v pochvakh]*. Diss. Moscow; 1999. (in Russian)
5. Fisk A.C., DeWit M., Wayland Z., Kuzyk N., Burgess R., Letcher B. et al. An assessment of the toxicological significance of anthropogenic contaminants in Canadian Arctic wildlife. *Sci Total Environ*. 2005: 351–93.
6. Anda E.E., Nieboer E., Dudarev A.A., Sandanger T.M., Odland J.O. Intra- and intercompartmental associations between levels of organochlorines in maternal plasma, cord plasma and breast milk, and lead and cadmium in whole blood, for indigenous peoples of Chukotka. *J Environ Monit*. 2007; 9: 884–93.
7. Nost T.H., Vestergren R., Berg V., Nieboer E., Odland J.O., Sandanger T.M. Repeated measurements of per- and polyfl uoroalkyl substances (PFASs) from 1979 to 2007 in males from northern Norway: Assessing time trends, compound correlations and relations to age/birth cohort. *Environ Int*. 2014; 67: 43–53.
8. Zachinyaeva A.V., Lebedeva E.V. Micromycetes of polluted soils of the North-West region of Russia and their role in the pathogenesis of allergic forms of mycoses. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2003; 37 (5): 69–74. (in Russian)
9. Zalar P., Gunde-Cimerman N. Cold-Adapted Yeasts in Arctic Habitats. In: Buzzini P., Margesin R., eds. *Cold-adapted yeasts*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2014: 49–74.
10. Connell L.B., Rodriguez R.R., Redman R.S., Dalluge J.J. Cold-Adapted Yeasts in Antarctic Deserts. In: Buzzini P., Margesin R. (eds). *Cold-adapted Yeasts*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2014: 76–98.
11. Selbmann L., De Hoog G.S., Zucconi L., Isola D., Onofri S. Black yeasts in cold habitats. In: Buzzini P., Margesin R. (eds) *Cold-adapted Yeasts*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2014: 173–90.
12. Hassan N., Rafiq M., Hayat M., Shah A.A., Hasan F. Psychrophilic and psychrotrophic fungi: a comprehensive review. *Rev Environ Sci Bio*. 2016; 15 (2): 147–72.
13. Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Novozhilov Yu.K., Abakumov E.V., Barantsevich E.P. Assessment of Anthropogenic Influence on Antarctic Mycobiota in Areas of Russian Polar Stations. *Contemp Probl Ecol*. 2018; 11 (5): 449–57.
14. Hisdal V. *Svalbard nature and history*. Oslo: Norwegian Polar Institute; 1998. 123 p.
15. Zvyagintsev D.G. *Methods of soil microbiology and biochemistry [Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii]*. Moscow: MSU; 1991. 304 p. (in Russian)
16. Pestova N.E., Barantsevich E.P., Ribkova N.S., Kozlova N.S., Barantsevich N.E. Study of effectiveness of sequencen of fragment of 16S RRNA gene in identification of microorganisms. *Profilakticheskaya i klinicheskaya medicina*. 2011; 4 (41): 54–5. (in Russian)
17. Hoch H.C., Galvani C.D., Szarowski D.H., Turner J.N. Two new fluorescent dyes applicable for visualization of fungal cell walls. *Mycologia*. 2005; 97 (3): 580–8.
18. Polyanskaya L.M., Zvyagintsev D.G. The content and composition of microbial biomass as an index of the ecological status of soil. *Eurasian J Soil Sci*. 2005; 38 (6): 625–33.
19. Kirtsideli I. Yu., Vlasov D.Yu., Abakumov E.V., Barantsevich E.P., Novozhilov Ju.K., Krylenkov V.A. et al. Airborne fungi in arctic settlement Tiksi (Russian Arctic, coast of the Laptev Sea). *Czech polar Rep*. 2017; 7 (2): 300–10.

20. Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Krylenkov V.A., Sokolov V.T. Aeromikota in locations of the Russian Arctic stations in the water areas of the White, Barents and Kara Seas. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2011; 45 (3): 228–39. (in Russian)
21. Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Krylenkov V.A., Rolle N.N., Barantsevich E.P., Sokolov V.T. Comparative Study of Airborne Fungi at Arctic Stations Near Water Area of the Northern Sea Route. *Ekologiya cheloveka [Human Ecology]*. 2018; 4: 16–21. (in Russian)
22. Kirtsideli I.Yu. Soil micromycetes from arctic tundras of Kara sea Taymir coast. *Mikologiya i fitopatologiya*. 1999; 33 (1): 19–24. (in Russian)
23. Korneykova M.V., Evdokimova G.A. Microbiota of the ground air layers in natural and industrial zones of the Kola arctic. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*. 2018; 53 (3): 271–7.
24. Singh S.M., Singh S.K., Yadav L.S., Singh P.N., Ravindra R. Filamentous soil fungi from Ny-Ålesund, Spitsbergen, and screening for extracellular enzymes. *Arctic*. 2012; 65 (1): 45–55.
25. Kurek E., Korniłowicz-Kowalska T., Słomka A., Melke J. Characteristics of soil filamentous fungi communities isolated from various micro relief forms in the high Arctic tundra (Bellsund region, Spitsbergen). *Pol Polar Res*. 2007; 28: 57–73.
26. Matveeva N.V., Zanolka L.L., Afonina O.M., Potemkin A.D., Patova E.N., Davydov D.A. et al. *Plants and fungi of the polar deserts of the Northern Hemisphere [Rasteniya i griby polyarnykh pustyn' Severnogo polushariya]*. Komarov Botanical Institute RAS. Saint-Petersburg: Marafon; 2015. (in Russian)
27. Pang K.L., Chiang M.W., Vrijmoed L.L.P. *Havispora longyearbyensis* gen. et sp. nov.: An arctic marine fungus from Svalbard, Norway. *Mycologia*. 2008; 100: 291–5.
28. Zhang T., Wang N.F., Liu H.Y., Zhang Y.Q., Yu L.Y. Soil pH is a Key Determinant of Soil Fungal Community Composition in the Ny-Ålesund Region, Svalbard (High Arctic). *Front Microbiol*. 2016; 7: 227. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00227.
29. Zhu R., Chen Q., Ding W., Xu H. Impact of seabird activity on nitrous oxide and methane effluxes from High Arctic tundra in Svalbard, Norway. *J Geophys Res*. 2012; 117: G04015. DOI: 10.1029/2012JG002130.
30. Ali S.H., Alias S.A., Siang H.Y., Smykla J., Pang K.L., Guo S.Y. Studies on diversity of soil microfungi in the Hornsund area, Spitsbergen. *Pol Polar Res*. 2013; 34: 39–54. DOI: 10.2478/popore-2013-0006.
31. Cox F., Newsham K.K., Bol R., Dungait J.A., Robinson C.H. Not poles apart: Antarctic soil fungal communities show similarities to those of the distant Arctic. *Ecol Lett*. 2016; 19 (5): 528–36.
32. Kochkina G.A., Ivanushkina N.E., Ozerskaya S.M. Structure of mycobiota of permafrost. *Mikologiya segodnya*. 2011; 2: 178–84. (in Russian)
33. Ozerskaya S., Kochkina G., Ivanushkina N., Gilichinsky D.A. Fungi in permafrost. In: Margesin R., ed. *Permafrost soils*. Springer; 2009: 85–95.
34. Buzzini P., Branda E., Goretti M., Turchetti B. Psychrophilic yeasts from worldwide glacial habitats: diversity, adaptation strategies and biotechnological potential. *FEMS Microbiol Ecol*. 2012; 82 (2): 217–41.
35. Sanitary rules SP 1.3.2322-08 «Security work with microorganisms of III–IV pathogenicity groups (hazard) and agents of parasitic infections»; 2008. (in Russian)