

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ МИКРОМИЦЕТОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ БИБЛИОТЕК РОССИИ

© 2024 г. Т. Д. Великова^а, Е. А. Попихина^{а, *}, Е. С. Трепова^а, С. С. Хазова^а

^аФедеральный центр консервации библиотечных фондов,
Российская национальная библиотека, Санкт-Петербург, Россия
*e-mail: fcc@nir.ru

Поступила в редакцию 10.07.2023 г.

После доработки 02.10.2023 г.

Принята к публикации 03.10.2023 г.

В 57 городах России, расположенных в семи федеральных округах (Северо-Западном, Центральном, Южном, Приволжском, Уральском, Сибирском, Дальневосточном), исследованы структуры сообществ микромицетов воздушной среды библиотек. Выделено и идентифицировано 107 видов микромицетов из 41 рода. Экосистема воздуха внутреннего пространства хранилищ библиотек за счет сходных в большинстве случаев условий хранения достаточно стабильна, с умеренным разнообразием и высоким уровнем выровненности видов, что подтверждается соответствующими индексами: индекс Шеннона варьировал от 2.7 до 3.4, индекс разнообразия Макинтоша — от 22.7 до 140.8, индекс Менхиника — от 2.1 до 3.0. Индекс доминирования Симпсона не превышал 0.11, а индекс Бергера-Паркера — 0.24. Значения индексов выровненности Макинтоша составили 0.71–0.78, Пие-лоу — 0.79–0.85. Установлена высокая степень сходства таксономических структур, получаемых независимо от климатических условий обследуемых регионов, что подтверждается значениями коэффициентов Стургена-Радулеску (0.08–0.77) и Мориситы-Хорна (0.04–0.47). Выявлены типичные представители изучаемой микобиоты: *Aspergillus versicolor* (7.5–14.3), *Cladosporium cladosporioides* (17.5–40.5), *C. herbarum* (0.8–53.6) и *Penicillium aurantiogriseum* (6.5–32.4). Большинство остальных видов малочисленны, с частотой встречаемости, не превышающей 7.1%.

Ключевые слова: грибы, микромицеты, аэромикота, биоразнообразие, библиотеки, письменное наследие

DOI: 10.31857/S0026365624010079

Споры плесневых грибов — одна из основных составляющих биоаэрозоля атмосферного воздуха. Присутствие значительного количества микромицетов в воздухе библиотек может представлять опасность, с одной стороны, для здоровья хранителей и читателей, а с другой — для документов, так как многие виды обладают целлюлазной и протеолитической активностью и способны повреждать библиотечные материалы.

Грибы встречаются во всех хранилищах в странах с самыми разными климатическими условиями, а их источником является наружный воздух. Условия в помещениях библиотек, архивов, музеев в целом однотипны, однако системы вентиляции и кондиционирования в здании влияют на концентрацию микроорганизмов, находящихся в воздухе.

Самый масштабный анализ аэромикоты был проведен по результатам исследований в 27 разных странах: идентифицировано 580 видов грибов, принадлежащих к 207 родам. Наиболее часто в архивах и библиотеках встречались грибы родов *Alternaria*,

Aspergillus, *Penicillium*; у *Chaetomium*, *Fusarium* и *Geotrichum* отмечена более высокая, чем обычно, частота встречаемости (Pinheiro et al., 2019). Многие грибы, выделенные из воздуха, способны разлагать целлюлозу (García et al., 2014). Представители родов *Alternaria*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Stachybotris*, *Stemphylium*, *Trichoderma* встречаются повсеместно (Zyska, 1997; García et al., 2014). Наиболее часто встречаются *Paecilomyces* (Maggi et al., 2000; Богомолова, 2012; Caicedo et al., 2023), *Candida* и *Rhodotorula* (Borrego, Perdomo, 2014), *Aureobasidium* (Попихина и соавт., 2018; Chuenko et al., 2020), *Botrytis*, *Cephalosporium*, *Phoma* (Zielińska-Jankiewicz et al., 2008; Попихина и соавт., 2018), *Cephalosporium*, *Humicola*, *Phoma* (Rojas et al., 2012; Zerek, 2014; Ghosh et al., 2014), *Ulocladium* (Трепова и соавт., 2011; Великова и соавт., 2012; Лебедева, Мамаева, 2012). Наиболее распространенными в воздухе и на поверхности объектов являются грибы родов *Aspergillus*, *Penicillium* и *Cladosporium* (Borrego, Perdomo, 2016; Pyrrri et al.,

2020), причем *Aspergillus* является доминирующим видом в тропических регионах.

В составе микробиоты, кроме повсеместно встречающихся десяти родов грибов, упомянутых выше, в воздухе также присутствуют характерные для каждой библиотеки микромицеты с высокой частотой встречаемости. Так, в мичиганских библиотеках в значительном количестве присутствовали *Arthrini*, *Epicoccum* (Burge et al., 1978), в Колумбии — *Chrysonilia*, *Curvularia* (Caicedo et al., 2023), в индийских библиотеках, где влажность летом достигает 90%, — *Curvularia*, *Drechslera*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Helminthosporium*, *Sirosporium* (Ghosh et al., 2014), в библиотеке Львовского университета — *Eidamella*, *Fusidium*, *Mortierella*, *Muxotrichum* (Yavorska et al., 2016), в кубинском Национальном музее музыки — *Alternaria*, *Eurotium*, *Fusarium*, *Chrysonilia* (García et al., 2014), в библиотеке Технического университета в Румынии значительно преобладали *Alternaria* и *Cladosporium* (Apetrei et al., 2009). В варшавских архивах чаще всего обнаруживали микромицеты, относящиеся к родам *Epicoccum*, *Fusarium*, *Scopulariopsis*, а в библиотеке Варшавского университета — другие: *Gliomastix*, *Rhizoctonia*, *Rhodotorula*, *Stysanus* (Zielińska-Jankiewicz et al., 2008). Наряду с грибами, встречающимися в других библиотеках, из воздуха семи исторических зданий Гаваны, предназначенных для хранения документов, книг, картин, фотографий и предметов доколумбовой культуры, были выделены редкие виды, принадлежащие к родам *Bipolaris*, *Chaetosartorya*, *Emericella*, *Cunninghamella*, *Monocillium*, *Pithomyces*, *Periconia*, *Staphylotrichum* (Rojas et al., 2012), а в воздухе Национального архива Кубы — другие редкие: *Beltraniella*, *Chrysosporium*, *Harposporium*, *Neurospora*, *Nigrospora*, *Scolecobasidium* (Borrego et al., 2022). В Национальной библиотеке Греции обнаружены грибы родов, не встречающихся в других библиотеках: *Acrodonium*, *Arthrini*, *Chalastospora*, *Dichobotrys*, *Myrothecium*, *Spiniger* (Pyrrgi et al., 2020), в медицинской библиотеке Ирана — рода *Syncephalastrum* (Chadeganipour et al., 2013).

Из воздуха Научной библиотеки Санкт-Петербургского университета изолированы микромицеты родов *Exophiala*, *Gilmaniella*, *Oidiodendron*, *Phaeococcomyces*, *Sphaerostilbella*, *Phialemonium**, *Pseudogymnoascus** (*таксоны даются в современной номенклатуре) (Богомолова, 2014). Большое количество родов идентифицировано в воздухе хранилищ Российской национальной библиотеки, причем некоторые были обнаружены во всех фондах: *Acremonium*, *Chrysonilia*, *Microascus*, *Oospora*, *Scopulariopsis*, *Sporotrichum*, *Torula*. Другие присутствовали только в отдельных книгохранилищах: *Chloridium*, *Hormodendrum*, *Monocillium*, *Phialophora*, *Rhinocladium*, *Tubercularia*, *Verticillium* (Трепова и соавт., 2011; Попихина и соавт., 2018), *Aureobasidium*, *Pseudocosmospora**, *Sphaerostilbella*,

Stachylidium, *Talaromyces* (Богомолова, 2014; Великова и соавт., 2012), *Ascochyta*, *Geotrichum*, *Fusarium*, *Paecilomyces*, *Trichosporiella* (Лебедева, Мамаева, 2012). В библиотеках Польши выделены грибы родов *Acrothecium*, *Chloridium*, *Curvularia*, *Epicoccum*, *Helminthosporium*, *Pellicularia*, *Pullularia*, *Rhizoctonia*, *Sepedonium*, *Thielavia*, *Trichocladium*, *Verticillium* (Zerek, 2014), в библиотеках институтов Киева — *Arthrobotrys*, *Chrysonilia*, *Dendryphium*, *Exophiala*, *Hormiscum*, *Mortierella* (Chuenko et al., 2020).

Пыль, являясь одним из носителей спор грибов, не только оказывает физическое воздействие на материалы документов, но также создает специфическую микросреду и трофический ресурс для самих микроорганизмов. В пыли Государственного архива в Риме в плохо проветриваемом помещении обнаружены грибы родов *Acremonium*, *Alternaria*, *Arthrini*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Emericella*, *Penicillium*, *Periconia*, *Pithomyces*, *Torula*, *Trichoderma* (Maggi et al., 2000), в Национальном архиве Кубы *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Penicillium* (Borrego et al., 2022); в пыли около компьютеров в библиотеке технического университета в Румынии — *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Fusarium*, *Chaetomium* (Apetrei et al., 2009).

В количественном отношении преобладают грибы родов *Aspergillus* (11–48%), *Penicillium* (23–89%), *Cladosporium* и *Fusarium* (10–18%), *Rhizopus* (6%) и, в меньшем количестве, — *Alternaria* и *Trichoderma* (Rojas et al., 2012; Caicedo et al., 2023).

Среди представителей рода *Aspergillus* присутствовал всюду и часто доминировал *A. niger*. Кроме него, чаще всего встречались следующие виды: в библиотеке Мадридского музея — *A. flavus* (Rodrigo, 1974), в Национальной библиотеке Греции — *A. caespitosus*, *A. sydowii*, *A. versicolor* (Pyrrgi et al., 2020), в библиотеке Мичиганского университета — *A. fumigatus* и *A. versicolor* (Burge et al., 1978), в индийских библиотеках — *A. caespitosus*, *A. fumigatus*, *A. flavus*, *A. candidus*, *A. flavus*, *A. fumigatus*, *A. ochraceus* (Ghosh et al., 2014). В воздухе Российской национальной библиотеки, кроме перечисленных выше, выделены *A. clavatus*, *A. flavipes*, *A. terreus*, *A. repens* (Лебедева, Мамаева, 2012). В воздухе ереванских библиотек изолировано 16 видов из рода *Aspergillus*, в том числе *A. awamori*, *A. candidus*, *A. carbonarius*, *A. kambarensis*, *A. nidulans*, *A. restrictus*, *A. recurvatus*, *A. sulphureus*, *A. terricola* (Элоян и соавт., 2016), в итальянских архивах — *A. sydowii*, *A. japonicus*, *A. versicolor* (Maggi et al., 2000). В украинских библиотеках преобладал *A. tenuissima*, а *A. flavus* и *A. fumigatus* были редкими видами (Chuenko et al., 2020). На Кубе был обнаружен новый вид, зарегистрированный в помещениях музея, — *Aspergillus carneus* (García et al., 2014).

Род *Penicillium* чаще всего был представлен следующими видами: *P. herquei* (Ghosh et al., 2014), *P. notatum* и *P. lanosum*, *P. chrysogenum*, *P. brevicompactum* (Богомолова, 2014), *P. chermesinum*,

P. citreonigrum, *P. citrinum*, *P. coprophylum*, *P. corylophilum*, *P. digitatum*, *P. griseofulvum*, *P. italicum*, *P. lividum*, *P. miczynskii*, *P. oxalicum*, *P. puberulum*, *P. restrictum*, *P. rugulosum*, *P. viridicatum*, *P. waksmani* (Maggi et al., 2000), в Российской национальной библиотеке (РНБ) — *P. camemberti*, *P. commune*, *P. notatum*, *P. variotii*, *P. coryniferum*, *P. ochlochloron*, *P. oxalicum*, *P. simplicissimum*, *P. solitum*, *P. glabrum*, *P. commune* (Трепова и соавт., 2011; Великова и соавт., 2012; Попихина и соавт., 2018), доминирующим видом был *P. aurantiogriseum*, хотя в воздухе других библиотек его наличие упоминалось редко.

При микологическом анализе воздуха в библиотеках очень важно выделение грибов-продуцентов целлюлозолитических и протеолитических ферментов, так как они являются потенциальными агентами биоповреждения библиотечных материалов (Ghosh et al., 2014; Yavorska et al., 2016). В случае обнаружения грибов родов *Chaetomium*, *Trichoderma* и *Stachybotrys* необходим контроль состояния документов для предотвращения колонизации их на бумаге. Присутствие в воздухе помещений в высоких концентрациях грибов *Stachybotrys atra*, *Trichoderma viride* и *Stachybotrys chartarum* (Pinheiro et al., 2019; Pyrrri et al., 2020) неприемлемо, так как они опасны не только для ценных экспонатов, но представляют угрозу для библиотекарей, реставраторов и читателей. В качестве потенциальных возбудителей аспергиллезов и микозов, имеющих различные клинические проявления, являются виды *A. flavus*, *A. fumigatus*, *A. versicolor*, *A. candidus*, *A. clavatus*, *A. glaucus*, *A. nidulans*, *A. niger*, *A. restrictus*, *A. sydowii*, *A. terreus*, которые постоянно обнаруживаются в воздухе библиотек; наиболее опасными являются первые три вида.

Целью данной работы была оценка видового богатства и таксономической структуры микромицетов, изолированных из воздуха библиотек различных регионов России, и выявление комплекса микромицетов, характерных для воздуха книгохранилищ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроорганизмы в воздухе книгохранилищ отбирали аспирационным методом при помощи пробоотборника MAS-100 Eco (“Merck Millipore”, Германия). Пробы воздуха отбирали на питательную среду Чапека–Докса на разных этажах библиотеки, при ярусном расположении книгохранилищ — на разных ярусах по принципу конверта: одна проба в центре, четыре — по углам помещения. Чашки Петри выдерживали в течение 5–14 сут при температуре $(29 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Выделенные из воздуха микромицеты изолировали, морфологию клеток определяли при помощи световой микроскопии и общепринятой техники микроскопирования на микроскопах Olympus BX

53 M (“Olympus Corp.”, Япония) и Leica DM 2000 (“Leica Microsystems”, Германия). Микромицеты идентифицировали на основании культурально-морфологических признаков, используя определители отечественных и зарубежных авторов (Raper et al., 1968; Raper et al., 1977; Sutton et al., 1997; Domsch et al., 2007). Наименования таксонов представлены в соответствии с электронной базой данных в области микологической номенклатуры Index Fungorum.

Наличие видов грибов в воздухе характеризовали показателем частоты встречаемости (ЧВ).

Для анализа иерархии микобиоты использованы следующие пропорции таксономических рангов: видов в семействе (В/С), родов в семействе (Р/С), видов в роде (В/Р) и видов в классе (В/К).

Микобиоты исследуемых сообществ анализировали при помощи индекса видового разнообразия Шеннона, индексов выровненности Пилоу и Макинтоша (D_{Mc}), индексов доминирования Симпсона (D) и Бергера–Паркера и разнообразия Макинтоша (U) и Менхиника.

Для анализа сходства микобиоты воздуха разных регионов между собой использовали бинарные коэффициенты видового отличия Стургена–Радулеску (p_s) и сходства Мориситы–Хорна (C_{MH}) (Лентьев, 2008; Magurran, 2013).

В работе представлены данные по микологическому состоянию воздуха областных и региональных библиотек России 57 городов, расположенных в семи Федеральных округах (ФО):

- из восьми городов Северо-Западного (Nw);
- из 11 городов Центрального (C);
- из шести городов Южного (St);
- из 11 городов Приволжского (V);
- из Челябинска и Ханты-Мансийска, принадлежащих к Уральскому (Ur);
- из девяти городов Сибирского (Sb);
- из семи городов Дальневосточного (FE).

Состав аэромикоты в различных ФО России сравнивали с видовым составом микромицетов, выделенных из воздуха шести библиотек Санкт-Петербурга (SPb).

Статистическая обработка результатов выполнена методами многомерной статистики в программах Microsoft Excel и Statistica Ultimate Academic 13.3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Количество проб, отобранных из воздуха хранилищ во всех регионах, составило 1409, а общее количество идентифицированных изолятов — 2221; всего выделено 107 видов микромицетов из 41 рода (табл. 1).

Таблица 1. Видовой состав микромицетов, выделенных из воздуха хранилищ России

Виды микромицетов	SPb	Nw	C	St	V	Ur	Sb	FE
<i>Acremonium charticola</i> (Lindau) W. Gams		+	+					
<i>Acremonium rutilum</i> W. Gams			+					
<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl.		+	+	+	+	+	+	+
<i>Alternaria consortialis</i> (Thüm.) J. W. Groves et S. Hughes		+	+	+	+		+	+
<i>Alternaria tenuissima</i> (Kunze) Wiltshire	+			+				
<i>Ascospirella lutea</i> (Zukal) Houbraken, Frisvad et Samson					+			
<i>Aspergillus alliaceus</i> Thom et Church								+
<i>Aspergillus candidus</i> Link								+
<i>Aspergillus elegans</i> Gasperini	+							
<i>Aspergillus fischeri</i> Wehmer	+							
<i>Aspergillus flavipes</i> (Bainier et R. Sartory) Thom et Church				+				
<i>Aspergillus flavus</i> Link	+	+	+	+	+		+	+
<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen.		+	+	+	+		+	
<i>Aspergillus neoniveus</i> Samson, S. W. Peterson, Frisvad et Varga			+					
<i>Aspergillus nidulans</i> (Eidam) G. Winter			+					
<i>Aspergillus niger</i> Tiegh.	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Aspergillus ochraceus</i> G. Wilh.		+	+		+		+	+
<i>Aspergillus repens</i> (Corda) Sacc.		+				+		+
<i>Aspergillus sclerotiorum</i> G. A. Huber			+					
<i>Aspergillus silvaticus</i> Fennell et Raper			+					
<i>Aspergillus sulphureus</i> (Fresen.) Thom et Church				+	+			
<i>Aspergillus sydowii</i> (Bainier et Sartory) Thom et Church	+	+	+	+	+			+
<i>Aspergillus terreus</i> Thom	+							
<i>Aspergillus terricola</i> Marchal et É. J. Marchal				+				
<i>Aspergillus ustus</i> (Bainier) Thom et Church		+	+	+	+		+	+
<i>Aspergillus versicolor</i> (Vuill.) Tirab.		+	+	+	+	+	+	+
<i>Aspergillus wentii</i> Wehmer								+
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary et Löwenthal) G. Arnaud			+		+		+	
<i>Beauveria bassiana</i> (Bals.-Criv.) Vuill.			+					
<i>Bisifusarium dimerum</i> (Penz.) L. Lombard et. Crous			+					
<i>Botrytis cinerea</i> Pers.	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze		+	+	+	+	+		
<i>Cladosporium brevicompactum</i> Pidopl. et Deniak		+			+			
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Cladosporium herbarum</i> (Pers.) Link		+	+	+	+	+	+	+
<i>Cladosporium sphaerospermum</i> Penz.		+	+	+		+		+
<i>Cordyceps farinosa</i> (Holmsk.) Kepler, B. Shrestha et Spatafora		+	+	+				
<i>Cosmospora butyri</i> (J.F.H. Beyma) Gräfenhan, Seifert et Schroers				+				+
<i>Didymella glomerata</i> (Corda) Qian Chen et L. Cai				+			+	
<i>Fusarium anguioides</i> Sherb.		+						
<i>Fusarium poae</i> (Peck) Wollenw.			+					
<i>Fusarium solani</i> (Mart.) Sacc.			+					+

Виды микромицетов	SPb	Nw	C	St	V	Ur	Sb	FE
<i>Fusarium sporotrichioides</i> Sherb.								+
<i>Geotrichum candidum</i> Link			+	+		+	+	
<i>Hypomyces chrysospermus</i> Tul.						+		
<i>Ilyonectria radicola</i> (Gerlach et. L. Nilsson) P. Chaverri et Salgado						+		
<i>Microascus brevicaulis</i> S. P. Abbott			+		+			
<i>Monilia pruinosa</i> Cooke et Masee			+					
<i>Mucor circinelloides</i> Tiegh.				+				
<i>Mucor plumbeus</i> Bonord.		+	+	+	+		+	+
<i>Mycelia sterilia</i> c/o			+	+	+	+	+	+
<i>Mycelia sterilia</i> т/o			+	+		+		+
<i>Neurospora sitophila</i> Shear et B. O. Dodge		+	+	+	+			
<i>Oospora lutea</i> Kamyschko		+	+	+	+			+
<i>Paecilomyces variotii</i> Bainier	+		+	+	+		+	+
<i>Penicillium aurantiogriseum</i> Dierckx	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Penicillium brevicompactum</i> Dierckx		+	+	+	+	+		+
<i>Penicillium camemberti</i> Thom		+	+	+	+	+	+	+
<i>Penicillium canescens</i> Sopp	+	+	+					
<i>Penicillium chrysogenum</i> Thom		+	+	+				+
<i>Penicillium commune</i> Thom		+	+	+	+	+	+	+
<i>Penicillium corylophilum</i> Dierckx		+	+					
<i>Penicillium decumbens</i> Thom			+		+			+
<i>Penicillium elegans</i> Sopp					+		+	
<i>Penicillium expansum</i> Link							+	
<i>Penicillium glabrum</i> (Wehmer) Westling		+	+	+	+			+
<i>Penicillium granulatum</i> Bainier	+	+	+		+			
<i>Penicillium herquei</i> Bainier et Sartory			+		+			
<i>Penicillium hirsutum</i> Dierckx			+				+	
<i>Penicillium implicatum</i> Biourge			+		+			+
<i>Penicillium janczewskii</i> K. W. Zaleski					+			
<i>Penicillium jensenii</i> K. W. Zalesky	+	+		+		+		+
<i>Penicillium lanosum</i> Westling	+		+		+		+	+
<i>Penicillium miczynskii</i> K. W. Zalesky		+						+
<i>Penicillium multicolor</i> Grig.-Man. et Porad.	+							
<i>Penicillium nalgiovense</i> Laxa	+			+				
<i>Penicillium ochrochloron</i> Biourge	+	+	+		+		+	
<i>Penicillium purpureescens</i> (Sopp) Biourge		+						
<i>Penicillium simplicissimum</i> (Oudem.) Thom		+	+		+			+
<i>Penicillium solitum</i> Westling			+		+		+	+
<i>Penicillium spinulosum</i> Thom	+							
<i>Penicillium thomii</i> Maire			+					+
<i>Ramichloridium apiculatum</i> (J. H. Mill., Giddens et A. A. Foster) de Hoog						+		
<i>Rectifusarium ventricosum</i> (Appel et Wollenw.) L. Lombard et Crous			+					

Виды микромицетов	SPb	Nw	C	St	V	Ur	Sb	FE
<i>Rhizopus stolonifer</i> (Ehrenb.) Vuill.	+	+	+	+	+			+
<i>Phoma herbarum</i> Westend.			+			+		
<i>Sarocladium strictum</i> (W. Gams) Summerb.		+	+			+		+
<i>Scopulariopsis brumptii</i> Salv.-Duval			+					
<i>Sporothrix schenckii</i> Hektoen et C. F. Perkins								+
<i>Sporotrichum verticillatum</i> Spreng.			+	+	+			+
<i>Stachybotrys chartarum</i> (Ehrenb.) S. Hughes		+	+					
<i>Stemphylium botryosum</i> Wallr.			+					
<i>Taeniolella stilbospora</i> (Corda) S. Hughes			+					
<i>Talaromyces duclauxii</i> (Delacr.) Samson, N. Yilmaz, Frisvad et Seifert			+					
<i>Talaromyces funiculosus</i> (Thom) Samson, N. Yilmaz, Frisvad et Seifert	+			+	+			
<i>Talaromyces purpureogenus</i> Samson, N. Yilmaz, Houbraken, Spierenb., Seifert, Peterson, Varga et Frisvad	+		+		+			+
<i>Talaromyces ruber</i> (Stoll) N. Yilmaz, Houbraken, Frisvad et Samson						+		
<i>Talaromyces rugulosus</i> (Thom) Samson, N. Yilmaz, Frisvad et Seifert	+							
<i>Talaromyces variabilis</i> (Sopp) Samson, N. Yilmaz, Frisvad et Seifert	+	+	+					+
<i>Torula expansa</i> (Kunze) Pers.					+			+
<i>Torula herbarum</i> (Pers.) Link		+	+	+	+	+	+	+
<i>Torula lucifuga</i> Oudem.	+	+	+	+		+	+	
<i>Trichoderma koningii</i> Oudem.			+					
<i>Trichoderma polysporum</i> (Link) Rifai			+					
<i>Trichoderma pseudokoningii</i> Rifai	+							
<i>Trichoderma viride</i> Pers.		+	+	+	+		+	+
<i>Trichosporum macrosporum</i> Kamyschko				+				
<i>Tritirachium roseum</i> J.F.H. Beyma								+
<i>Verticillium terrestre</i> (Pers.) Sacc.			+					

Состояние воздуха книгохранилищ всегда было удовлетворительным, и количество колониеобразующих единиц не превышало нормативных значений, рекомендуемых Всемирной организацией здравоохранения (500 КОЕ/м³) (WHO, 1990).

Со времен Р. Уиттекера, заложившего основу понятий разнообразия, строгих методов его количественной оценки, а также списка характерных видов до настоящего времени не выработано. Лучшим вариантом оценки биоразнообразия по-прежнему считается вычисление и обсуждение мультифрактальных спектров видовой структуры сообществ (Розенберг, 2013).

Во всех ФО отмечено умеренное видовое разнообразие: от 26 до 72 видов, индекс Шеннона варьировал от 2.7 до 3.4. Наибольшее количество видов (72) выделено из воздуха хранилищ Центрального ФО, где индекс Шеннона имел максимальное значение (3.4). Основным недостатком индекса Шеннона является то, что по сравнению с другими

индексами он придает большее значение редким видам (Одум, 1986). Полученные значения индекса разнообразия Макинтоша (U), зависящего от количества видов и образцов в выборке, подтвердили это положение и свидетельствовали о наибольшем богатстве видов в комплексе грибов, выделенных из воздуха Центрального ФО (140.8), тогда как наименьшее видовое богатство было в сообществах грибов воздуха библиотек Уральского ФО и Санкт-Петербурга: значения индекса U22.7 и 22.8 соответственно. В аэромикоте других округов видовое богатство находилось в пределах от 72.6 до 107.9.

Для нивелирования влияния различий объема выборок использовали индекс Менхиника, рассчитав который мы получили значительно меньший разброс видового богатства по сравнению с индексом разнообразия Макинтоша: от наибольшего (3.0) в воздухе библиотек Санкт-Петербурга и Уральского ФО до наименьшего

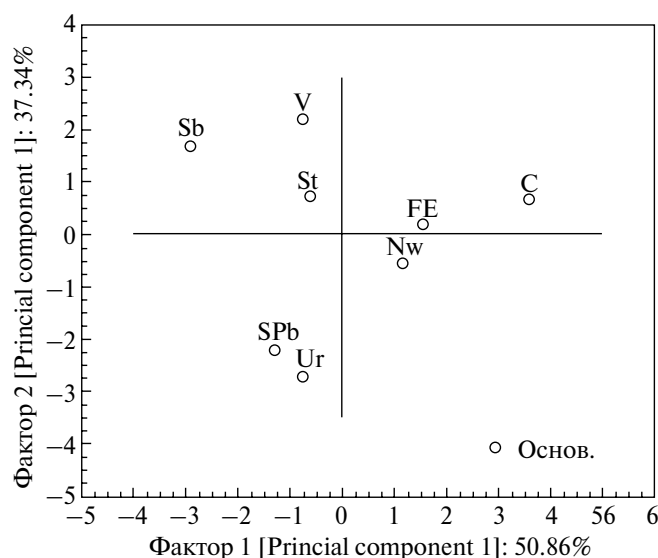


Рис. 1. Распределение разнообразия микобиот воздуха библиотек России в пространстве главных компонент.

(2.1) — в Сибирском ФО, что свидетельствует о высоком видовом богатстве в аэромикоте хранилищ во всех регионах.

В каждой выборке уровень доминирования микромицетов в воздухе хранилищ невысок, что подтверждается низкими значениями индекса доминирования Симпсона (D), не превышающими 0.1 ни в одном из округов, кроме Сибирского ФО, в котором индекс был несколько выше — 0.11. Альтернативный индекс Бергера-Паркера, который показывает степень доминирования самого обильного вида, также имел низкие значения: минимальное (0.16) в Дальневосточном ФО и максимальное (0.24) в Южном и Приволжском ФО.

Выровненность видов в воздухе хранилищ библиотек рассчитывали при помощи двух индексов, в разной степени зависящих от объема выборки. Во всех регионах она находилась на стабильно высоком уровне, о чем свидетельствуют как индекс

Пиелоу (0.79–0.85), так и индекс Макинтоша (0.71–0.78), на значения которых в значительной степени не оказали влияния ни объем выборки, ни количество выделенных видов. Таким образом, можно говорить об отсутствии конкуренции видов, выделенных из воздушной среды библиотек, в каждом комплексе микромицетов.

Ввиду множества использованных индексов разнообразия, в определенной степени ограниченности и чувствительности каждого из них, сложно комплексно оценить полученные результаты. Для того чтобы учесть влияние каждого индекса, был использован факторный анализ методом ординации главных компонент (РСА), который позволил увидеть распределение в пространстве комплексов микромицетов, изолированных из воздуха книгохранилищ в различных округах (рис. 1).

Матрица различия составлена из количества видов, индексов видового богатства, доминирования, выровненности и разнообразия (табл. 2).

Расхождение по первой оси описывает 50.9% варьирования, а по второй оси — 37.3%. На долю остальных факторов пришлось 11.8% общей дисперсии, их в анализ не включили. Аэромикоты округов четко расходятся в пространстве главных компонент и формируют три кластера. Южный и Приволжский регионы, обладающие умеренно континентальным климатом, образовали одну группу; но в то же время далеко расположены относительно регионов со схожим климатом (Центральный и Уральский ФО). Аналогично, в кластер к Дальневосточному и Северо-Западному ФО, на климат которых сильное влияние оказывают морские воздушные массы, не попали микромицеты воздуха библиотек Санкт-Петербурга. Третий кластер сформирован аэромикотами библиотек из тех регионов, климат которых сильно отличается друг от друга: Уральский ФО и СПб. Таким образом, подтверждается гипотеза о том, что географическое положение и климат региона слабо влияют на экологическое разнообразие аэромикоты внутри

Таблица 2. Экологическое разнообразие микромицетов в воздушной среде хранилищ библиотечных документов в регионах России

Параметр	SPb	St	V	C	FE	Sb	Nw	U
Общее количество изолятов (N)	73	237	347	551	388	228	323	74
Всего проб	37	146	243	372	213	155	217	26
Всего видов	26	43	45	72	50	31	43	26
Индекс разнообразия Шеннона (H)	2.70	2.98	2.89	3.40	3.12	2.76	3.08	2.77
Индекс разнообразия Макинтоша (U)	22.8	72.6	107.9	140.4	103.9	75.8	86.7	22.7
Индекс доминирования Симпсона (D)	0.09	0.09	0.09	0.06	0.07	0.11	0.07	0.08
Индекс доминирования Бергера-Паркера	0.21	0.24	0.24	0.19	0.17	0.26	0.16	0.20
Индекс видового богатства Менхиника	3.0	2.8	2.4	3.1	2.5	2.1	2.4	3.0
Индекс выровненности Макинтоша (D_{Mc})	0.78	0.74	0.73	0.78	0.77	0.71	0.77	0.78
Индекс выровненности Пиелоу (E)	0.83	0.79	0.76	0.79	0.80	0.80	0.82	0.85

хранилищ библиотек, тем более не все виды грибов, неизбежно попадающие с потоками уличного воздуха в хранилища, могут адаптироваться к достаточно специфическим условиям внутри хранилищ библиотек и сохранить свою жизнеспособность.

Индексы разнообразия характеризуют достаточно стабильную экосистему видов в воздухе внутреннего пространства хранилищ библиотек за счет сходных в большинстве случаев условий хранения: во время обследований, проводимых в летне-осенний период, температура воздуха находилась в диапазоне 20–25°C, а относительная влажность не превышала 50% (Трепова, 2011). В большинстве обследованных библиотек климатическое оборудование отсутствовало, и нормализация температурно-влажностного режима осуществлялась путем проветривания.

Отделы. Таксономическую структуру аэромикоты хранилищ документов представляют три отдела: *Ascomycota*, который занимает более 90% видового богатства и присутствует во всех регионах, *Micoromycota*, насчитывающий от 2 до 7% видового богатства и отсутствующий в Уральском ФО, и самый малочисленный отдел *Basidiomycota* — 1–4%, виды которого отсутствуют в Сибирском и Северо-Западном ФО.

При сравнении соотношения рангов иерархии микобиоты воздуха хранилищ разных ФО России (в среднем) с микобиотой библиотек СПб выявлены следующие пропорции: видов в семействе (В/С) 2.8 и 3.7, соответственно, родов в семействе (Р/С) — 1.3 и 1.4, видов в роде (В/Р) — 2.3 и 2.6, видов в классе (В/К) — 6.9 и 5.2. Соотношения таксономических рангов относительно стабильны и не меняются в зависимости от удаленности друг от друга (табл. 3).

Классы. Наиболее богатые по числу видов во всех округах России следующие классы: *Eurotiomycetes*, *Sordariomycetes* и *Dothideomycetes*. Доли видов от общего числа варьировали в широких диапазонах: в классе *Eurotiomycetes* — от 36.0 до 80.0%, *Dothideomycetes* — 12.0–36.0% и *Sordariomycetes* — 4.0–28.0%; в остальных классах видовое богатство составляло менее 7.1%. Представители большинства классов встречались повсеместно, но микромицеты из класса *Tritirachiomycetes* выделены только в Дальневосточном ФО.

При сравнении видового богатства классов в разных округах отмечены следующие особенности: наибольшее количество видов класса *Eurotiomycetes* (60.0% от общего числа видов) выделено в Приволжском и Дальневосточном ФО; *Sordariomycetes* — 28.0 и 25.4% соответственно в Уральском и Центральном ФО; класс *Dothideomycetes* — 36.0 и 25.8% соответственно в Уральском и Сибирском ФО. Видовое богатство грибов, принадлежащих к классу *Leotiomycetes*, которые встречались во всех ФО, было максимальным в Южном ФО и составляло 7.1%.

Среди микромицетов, выделенных из воздуха хранилищ Санкт-Петербурга, на класс *Eurotiomycetes* приходилось наибольшее количество видов (80.0%), причем их количество было больше, чем количество видов этого класса, выделенных в любом из округов России. В то же время виды классов *Agaricomycetes*, *Saccharomycetes* и *Tritirachiomycetes* не обнаружены в воздухе хранилищ СПб, хотя встречались в библиотеках многих регионов.

Семейства. Анализ таксономических групп воздуха хранилищ выявил четыре ведущих семейства, которые обнаружены во всех регионах России и в библиотеках Санкт-Петербурга. Подавляющим в спектре видового богатства являлось семейство *Aspergillaceae*, которое в зависимости от региона насчитывало от 36.0 до 80.0% всего видового богатства, остальные семейства были не столь многочисленны. На втором месте, но с большим отрывом, находится семейство *Cladosporiaceae*, насчитывающее от 4.0–16.0% от общего количества видов в каждом из регионов, на третьем месте — *Pleosporaceae* — 4.0–12.0%, четвертое место занимает семейство *Torulaceae*, включающее 4.0–6.5% видов, и на пятом месте — *Hypocreaceae*, которое насчитывает от 2.0 до 4.0% всего видового богатства. Все перечисленные семейства в период обследования библиотек встречались повсеместно на территории России.

Следует отметить семейства, представители которых обнаружены в воздухе хранилищ библиотек только в одном из регионов: *Mytilinidiaceae* исключительно в Центральном ФО (1.4% от общего числа видов), *Trichocomaceae* — в Приволжском ФО (2.2%).

Таблица 3. Соотношения таксономических рангов в иерархиях микобиоты воздуха хранилищ ФО России и в библиотеках СПб

Соотношение рангов	Значения таксономических пропорций в регионах							
	SPb	Nw	C	St	V	Ur	Sb	FE
Вид/Семейство	3.7	2.9	3.2	2.4	2.9	1.9	3.0	3.4
Род/Семейство	1.4	1.2	1.5	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3
Вид/Род	2.6	2.4	2.2	2.1	2.4	1.6	2.5	2.6
Вид/Класс	5.2	8.6	10.0	5.9	7.3	4.6	5.0	6.7

Роды. За период исследования из воздуха хранилищ выявили грибы из 41 рода, в зависимости от экологической ниши их количество варьировало от 10 до 32. Максимальное количество родов зафиксировано в воздухе библиотек Центрального ФО (табл. 2).

В родовых спектрах преобладал *Penicillium*, который включал в себя 18.6–33.3% от общего числа видов, вторым ведущим родом с незначительным отставанием значений видового богатства был род *Aspergillus* — 11.5–23.5%, видовое богатство остальных родов варьировало от 0.3 до 15.4% от общего числа видов. Следует отметить, что в воздухе хранилищ библиотек Уральского ФО богатство видов рода *Cladosporium* незначительно превосходило богатство видов из рода *Aspergillus*. Отличительная особенность воздушной среды библиотек Южного ФО как по количеству видов, так и по количеству изолятов проявилась в преобладающем количестве грибов рода *Aspergillus* по сравнению с родом *Penicillium*. Это согласуется с данными о положительном действии температуры на грибы рода *Aspergillus* (Apetrei, 2009). Родовой состав аэромикоты библиотек Санкт-Петербурга имеет схожий с остальными регионами состав. Во многих библиотеках мира часто встречаются *Stachybotris* и *Stemphylium* (Великова, 2012; García, 2014; Zerek, 2014; Попихина, 2018), однако в наших исследованиях редко обнаруживаются потенциально патогенные грибы *Stachybotris* (только в Центральном и Северо-Западном ФО) и *Stemphylium* (только в Центральном ФО).

Виды. Анализ видового состава микромицетов, выделенных из воздушной среды библиотек округов России и Санкт-Петербурга, путем расчета бинарного коэффициента Стюгrena–Радулеску, коэффициента Мориситы–Хорна и проведения кластерного анализа позволил, с одной стороны, выявить особенности биологического разнообразия каждого отдельного исследуемого региона

и, с другой стороны, установить их сходство между собой.

Значения коэффициентов подтверждают различие видового состава микромицетов в семи исследуемых федеральных округах. Особенно высокие значения бинарного коэффициента Стюгrena–Радулеску отмечены при сравнении воздуха хранилищ библиотек Санкт-Петербурга с регионами России и библиотек Уральского ФО с остальными округами (табл. 4).

Максимальное различие отмечено для двух сравниваемых пар аэромикоты книгохранилищ: Уральского ФО и Санкт-Петербурга, а также Уральского и Южного ФО, что подтверждается достаточно низкими значениями коэффициента сходства Мориситы–Хорна, который основывается не только на первичных данных о количестве видов, но также учитывает как общее количество изолятов, так и количество изолятов каждого вида в отдельности.

Во всех округах в воздухе хранилищ документов обнаружены следующие 10 видов микромицетов: *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl., *Aspergillus niger* Tiegh., *Aspergillus versicolor* (Vuill.) Tirab., *Botrytis cinerea* Pers., *Cladosporium cladosporioides* (Fresen.), *Cladosporium herbarum* (Pers.) Link, *Penicillium aurantiogriseum* Dierckx, *Penicillium camemberti* Thom, *Penicillium commune* Thom и *Torula herbarum* (Pers.) Link., а во всех округах, включая библиотеки Санкт-Петербурга, — четыре вида: *Aspergillus niger*, *Botrytis cinerea*, *Cladosporium cladosporioides* и *Penicillium aurantiogriseum*.

Методом кластерного анализа на основании частоты встречаемости и равномерности распределения видов грибов для каждого округа сформирован комплекс, состоящий из характерных для него видов, — ядро аэромикоты (в табл. 5 эти ячейки выделены жирным шрифтом).

Таблица 4. Параметры сходства микромицетов воздуха в библиотеках России

Регионы России	SPb	St	V	C	FE	Sb	Nw	Ur	Коэффициент Стюгrena–Радулеску (The Stugrena–Radulesku coefficient)
SPb		0.77	0.59	0.67	0.59	0.63	0.54	0.69	
St	0.63		0.21	0.26	0.18	0.49	0.08	0.77	
V	0.78	0.86		0.08	0.08	0.08	0.25	0.55	
C	0.73	0.87	0.88		0.17	0.32	0.13	0.52	
FE	0.47	0.28	0.61	0.61		0.39	0.14	0.47	
Sb	0.66	0.79	0.82	0.78	0.54		0.31	0.41	
Nw	0.41	0.69	0.87	0.78	0.55	0.58		0.38	
Ur	0.26	0.04	0.17	0.47	0.52	0.40	0.37		
Коэффициент Мориситы–Хорна (The Morisita–Horn coefficient)									

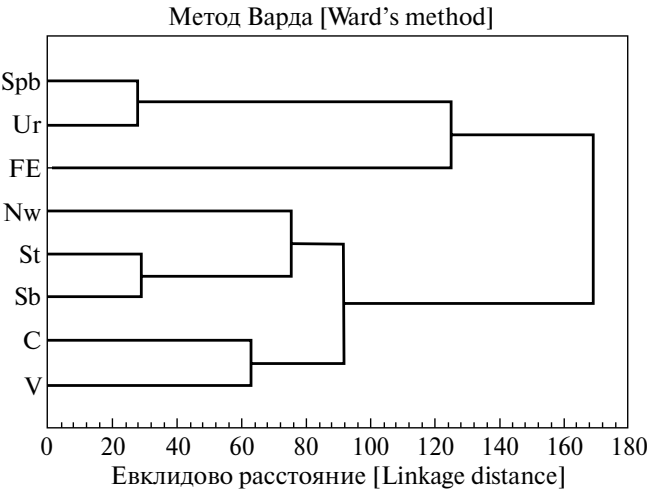


Рис. 2. Кластерный анализ сходства видового состава микромицетов, выделенных из воздуха хранилищ библиотек России.

Во всех выборках лидировали микромицеты рода *Cladosporium*: в подавляющем большинстве округов преобладал вид *C. cladosporioides*, за исключением Уральского ФО, где чаще всего встречался *C. herbarum*, являющийся редким или случайным для воздушной среды библиотек остальных округов России. Кроме микромицетов рода *Cladosporium*, в состав комплексов характерных видов регулярно входили *A. versicolor* и *P. aurantiogriseum*, причем последний имеет высокую частоту встречаемости, тогда как в аэромикоте библиотек, анализ которой представлен во

введении, *P. aurantiogriseum* упоминался только в архивах Кубы (Borrego, 2014; Borrego, 2022).

Большинство же видов в описываемых комплексах малочисленны: частота встречаемости видов, не вошедших в характерные для округов комплексы, варьировали от 1.2 до 7.1%, и в таком случае их относили к редким или, если частота встречаемости не превышала 1.2%, их рассматривали как случайные. Представители 43 видов встречались только в одном из регионов и также относились к случайным.

Таким образом, визуализация состава аэромикоты хранилищ библиотек в разных округах методом кластерного анализа показала, что даже в географически отдаленных районах видовой состав лидирующих по частоте встречаемости микромицетов однотипен и различается в основном за счет редких и случайных видов.

Распределение округов на группы по составу аэромикоты книгохранилищ, полученное методом кластерного анализа, как и распределение по ее разнообразию, полученное методом главных компонент, показывает, что климат не влияет на формирование кластеров. В данном случае получено два крупных кластера: первый — Санкт-Петербург, Уральский ФО и Дальневосточный ФО и второй — Северо-Западный ФО, Южный ФО, Сибирский ФО, Центральный ФО и Приволжский ФО (рис. 2).

Таким образом, в настоящей работе нами проведено масштабное исследование аэромикоты воздуха в библиотеках; охвачены почти все российские регионы, для каждого из которых определено ядро

Таблица 5. Представители микобиоты воздушной среды хранилищ библиотек России

Виды микромицетов	Федеральные округа России							
	SPb	NW	C	St	V	Ur	Sb	FE
<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl.	0	2.8	10.5	19.9	4.5	10.2	7.7	4.2
<i>Aspergillus flavus</i> Link	18.9	0.9	4.6	2.7	9.1	0	5.2	2.8
<i>Aspergillus niger</i> Tiegh.	10.8	6.5	1.6	9.6	5.3	3.6	7.7	8.5
<i>Aspergillus versicolor</i> (Vuill.) Tirab.	0	11.1	9.4		11.9	14.3	11.0	8.5
<i>Botrytis cinerea</i> Pers.	2.7	5.1	4.6	2.7	0.4	10.7	1.9	3.3
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries	40.5	17.5	28.5	39.9	34.2	25.0	38.1	24.4
<i>Cladosporium herbarum</i> (Pers.) Link	0	1.4	1.3	1.4	0.8	53.6	2.6	6.6
<i>Cladosporium sphaerospermum</i> Penz.	0	0.46	0.81	6.2	0	7.1	0	4.7
<i>Geotrichum candidum</i> Link	0	0	6.7	0.7	0	3.6	1.9	0
<i>Neurospora sitophila</i> Shear et B. O. Dodge	0	0.5	0.8	8.2	2.1	0	0	0
<i>Paecilomyces variotii</i> Bainier	2.7	0	0.3	2.7	3.7	0	3.2	4.2
<i>Penicillium aurantiogriseum</i> Dierckx	32.4	23.5	11.3	9.6	13.6	3.6	6.5	6.6
<i>Penicillium camemberti</i> Thom	0	4.6	4.3	2.7	4.1	3.6	3.9	0.5
<i>Penicillium commune</i> Thom	0	18.4	8.3	10.3	10.7	14.3	3.2	12.2
<i>Talaromyces funiculosus</i> (Thom) Samson, N. Yilmaz, Frisvad et Seifert	16.2	0	0	0.7	0.4	0	0	0
<i>Trichoderma viride</i> Pers.	0	2.8	2.4	0.7	12.3	0	3.9	1.4
<i>Torula herbarum</i> (Pers.) Link	0	2.3	3.0	3.4	1.2	3.6	1.9	0.9

аэромикоты. Вид *C. cladosporioides* входил в ядро аэромикоты повсеместно, независимо от климатических условий, в которых находилась та или иная библиотека.

Анализ экологического разнообразия микобиоты воздушной среды замкнутых пространств, обладающих однотипными микроклиматическими условиями, на примере хранилищ библиотек позволил продемонстрировать умеренное видовое разнообразие и достаточную стабильность описываемых комплексов, установить высокую степень сходства таксономических структур и списков характерных видов, получаемых независимо от климатических условий обследуемых регионов. Микроклиматические условия, сложившиеся в книгохранилищах, и отсутствие аварийных ситуаций в активной фазе объясняют стабильность экосистемы и, как следствие, отсутствие истинно доминирующих и присутствие большой доли сопутствующих и редких видов, способных к выживанию в сложившихся условиях.

Аэромикота книгохранилищ, безусловно, оказывает влияние и в значительной мере определяет виды грибов, которые находятся на поверхности документов и являются их потенциальными биоповреждающими агентами. Микромицеты, развивающиеся на бумаге документов, в большинстве обладают целлюлазной активностью (Vorreger et al., 2008) и в дальнейшем могут представлять интерес в качестве продуцентов целлюлозолитических ферментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа по анализу аэромикоты библиотек Санкт-Петербурга выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075–15–2021–1053), работа по анализу микобиоты воздуха регионов выполнена в рамках плановой темы ФЦКБФ “Исследования документов и реставрационных материалов для решения задач разработки и совершенствования методов консервации и реставрации” (номер госрегистрации 122041800046–2). Обследования библиотек регионов России выполнены в рамках Национальной программы сохранения библиотечных фондов Российской Федерации и Основных направлений развития деятельности по сохранению библиотечных фондов в Российской Федерации на 2011–2020 годы.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит результатов исследований с использованием животных в качестве объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богомолова Е. В. Аэромикологическое исследование помещений Научной библиотеки им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета // Микроскопические грибы в воздушной среде Санкт-Петербурга. СПб.: Химиздат, 2012. С. 79–87.
- Великова Т. Д., Горяева А. Г., Попихина Е. А., Трепова Е. С. Микромицеты воздушной среды хранилищ Российской национальной библиотеки в здании на набережной р. Фонтанки // Микроскопические грибы в воздушной среде Санкт-Петербурга. СПб.: Химиздат, 2012. С. 88–101.
- Лебедева Е. В., Мамаева Н. Ю. Микромицеты воздушной среды книгохранилищ Главного и Нового зданий Российской национальной библиотеки // Микроскопические грибы в воздушной среде Санкт-Петербурга. СПб.: Химиздат, 2012. С. 102–115.
- Леонтьев Д. В. Флористический анализ в микологии. Харьков, 2008. 108 с.
- Одум Ю. Экология. М.: Мир, 1986. Т. 2. 376 с.
- Попихина Е. А., Трепова Е. С., Горяева А. Г., Хазова С. С., Мамаева Н. Ю. Микобиота воздушной среды библиотек и документов // Успехи медицинской микологии. 2018. Т. 19. С. 47–53.
- Розенберг Г. С. О Роберте Макинтоше, индексе разнообразия и “AMERICAN MIDLAND NATURALIST” (заметки переводчика) // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. 2013. Т. 22. С. 128–144.
- Трепова Е. С., Мамаева Н. Ю., Шуленкова Е. И., Горяева А. Г. Мониторинг условий хранения документов в Российской национальной библиотеке // Труды Лаборатории консервации и реставрации документов СПФ АРАН. СПб.: Реликвия (реставрация, консервация, музеи), 2011. № 2. С. 65–72.
- Элоян И. М., Шахазизян И. В., Погосян А. В., Оганесян Е. Х., Нанагюлян С. Г. Грибы рода *Aspergillus* в воздухе различных помещений г. Еревана (Армения) // Биология, систематика и экология грибов и лишайников в природных экосистемах и агрофитоценозах: II Межд. научная конф., г. Минск — д. Каменюки, 20–23 сентября 2016 г. / Национальная академия наук Беларуси, ГНУ Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси, ГПУ Национальный парк “Беловежская пуша”. Минск: Колорград, 2016. С. 310–314.
- Apetrei I. C., Drăgănescu G. E., Popescu I. T., Carp-Cărare C., Guguianu E., Mihăescu T., Ștefanache A., Crețu C., Patraș X. Possible cause of allergy for the librarians: books manipulation and ventilation as sources of fungus spores spreading // Aerobiologia. 2009. V. 25. P. 159–166.
- Borrego S., Perdomo I. Caracterización de la micobiota aérea en dos depósitos del Archivo Nacional de la República de Cuba // Rev. Iberoam. Micol. 2014. V. 31. P. 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.riam.2013.09.004>
- Borrego S., Pons V., Perdomo I. La contaminación microbiana del aire en dos depósitos del Archivo Nacional de la República de Cuba // Revista CENIC. Ciencias Biológicas. 2008. V. 39. P. 63–69.
- Borrego S., Vivar I., Molina A. Affiliations Air- and dustborne fungi in repositories of the National Archive of the Republic of Cuba // Microbial Cell. 2022. V. 9. P. 103–122. <https://doi.org/10.15698/mic2022.05.776>
- Burge H. P., Boise J. R., Solomon W. R., Bandera E. Fungi in libraries: an aerometric survey // Mycopathologia. 1978. V. 64. № 2. P. 67–72.
- Caicedo Y. C., Pérez H. B., Fuentes M. M., Vergara-Vásquez E., Vélez-Pereira A. M. Assessment of fungal aerosols in a public library with natural ventilation // Aerobiologia. 2023. V. 39. P. 37–50. <https://doi.org/10.1007/s10453-022-09772-5>

- Chadeganipour M., Ojaghi R., Rafiei H., Afshar M., Hashemi S. T. Bio-deterioration of library materials: study of fungi threatening printed materials of libraries in Isfahan university of medical sciences in 2011 // Jundishapur J. Microbiol. 2013. V. 6. P. 127–131.
https://doi.org/10.5812/jjm.4751
- Chuenko A. I., Pysmenna Yu. B., Savchu Ya. I., Zatoka L. P., Kuyava L. M., Latina N. O. Microscopic fungi in the air of libraries of scientific institutions of Kyiv // Mikrobiologichnyi Zhurnal. 2020. V. 82. № 4. P. 63–70.
https://doi.org/10.15407/microbiolj82.04.063
- Domsch K. H., Gams W., Anderson T.-H. Compendium of soil fungi. IHV–Verlag Echingen, 2007. 672 p.
- García J. C. R., Rosales B. R., Alonso S. F. B. Evaluación de la calidad micológica ambiental para la conservación de los fondos documentales del Museo Nacional de la Música de Cuba en época de lluvia // AUG-MDOMUS. 2014. № 6. P. 123–146.
- Ghosh D., Dhar P., Chakraborty T., Uddin N., Das A. K. Study of aeromycoflora in indoor and outdoor environment of National Library, Kolkata // Int. J. Plant Anim. Environ. Sci. 2014. V. 4. P. 663–672.
- Maggi O., Persiani A. M., Gallo F., Valenti P., Pasquariello G., Sclocchi M.-C., Scorrano M. Airborne fungal spores in dust present in archives: proposal for a detection method, new for archival materials // Aerobiologia. 2000. V. 16. P. 429–434.
https://doi.org/10.1023/A:1026522826477
- Magurran A. E. Measuring biological diversity. Hoboken: John Wiley et Sons, 2013. 272 p.
- Pinheiro A. C., Sequeira S. O., Macedo M. F. Fungi in archives, libraries, and museums: a review on paper conservation and human health // Crit. Rev. Microbiol. 2019. V. 45. P. 686–700.
https://doi.org/10.1080/1040841X.2019.1690420
- Pyrri I., Tripyla E., Zalachori A., Chrysopoulou M. Fungal contaminants of indoor air in the National Library of Greece // Aerobiologia. 2020. V. 36. P. 387–400.
https://doi.org/10.1007/s10453-020-09640-0
- Raper K. B., Fennel D. I. The genus *Aspergillus*. New York: Robert E. Krieger Publishing Company, 1977. 686 p.
- Raper K. B., Thom C. A manual of the Penicillia. New York: Hafner Publishing Company, 1968. 875 p.
- Rodrigo V. N. Contaminación microbiológica en museos, archivos y bibliotecas // Revista de archivos, bibliotecas y museos, 1974. V. 77. P. 747–761.
- Rojas T. I., Aira M. J., Batista A., Cruz I. L., González S. Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana (Cuba) // Grana. 2012. V. 51. P. 44–51.
- Sutton D., Fothergill A., Rinaldi M. Guide to clinically significant fungi. Baltimore: Williams et Wilkins, 1997. 471 p.
- WHO. Indoor air quality: biological contaminants. Report on a WHO meeting // Copenhagen: WHO Regional publications. 1990. № 31. P. 1–67.
- Zerek B. F. The Preservation and Protection of Library Collections. A practical guide to microbiological control. Chandos Publishing, 2014. 227 p.
- Zielińska-Jankiewicz K., Kozajda A., Piotrowska M., Szadkowska-Staćzyk I. Microbiological contamination with moulds in work environment in libraries and archive storage facilities // Ann. Agric. Environ. Med. 2008. V. 15. P. 71–78.
- Zyska B. Fungi isolated from library materials: a review of the literature // Int. Biodeter. Biodegr. 1997. V. 40. P. 43–51.
https://doi.org/10.1016/S0964-8305(97)00061-9
- Yavorska G. V., Bilinska I. S., Hnatysh S. O., Os'mak G. S. Microbiological expertise of indoor air and books of scientific library of Ivan Franko national university of Lviv // Studia Biologica. 2016. V. 10. P. 75–88.
https://doi.org/10.30970/sbi.1001.447

Ecological Diversity of Micromycetes in Aerial Environments of Russian Libraries

T. D. Velikova¹*, E. A. Popikhina¹, E. S. Trepova¹**, and S. S. Khazova¹

¹Federal Center for Library Stock Preservation, National Library of Russia, St.-Petersburg, 191069 Russia

*e-mail: fcc@nir.ru

**e-mail: k.trepova@gmail.com

Received 07 July, 2023; revised 02 October 2024; accepted 03 October 2024

Abstract—The structure of micromycete communities in the library aerial environment was investigated in 57 Russian cities located in seven federal districts (Northwestern, Central, Southern, Volga, Ural, Siberian, and Far Eastern). A total of 107 micromycete species belonging to 41 genera were isolated and identified. Due to mostly similar conditions, the aerial ecosystem of internal spaces of the library storage facilities was relatively stable, with moderate diversity and high evenness, as was confirmed by the relevant indices: the Shannon index varied from 2.7 to 3.4, the McIntosh diversity index, from 22.7 to 140.8, and the Menhinick index, from 2.1 to 3.0. The Simpson's dominance index and the Berger–Parker index did not exceed 0.11 and 0.24, respectively. The McIntosh and Pielou's evenness indices were 0.71–0.78 and 0.79–0.85, respectively. High similarity of the taxonomic structures, independent of climatic conditions of the studied regions, was revealed, as was confirmed by the values of the Stugren–Radulescu and Morisita–Horn coefficients: 0.08–0.77 and 0.04–0.47, respectively. The typical members of the studied mycobiota were *Aspergillus versicolor* (7.5–14.3), *Cladosporium cladosporioides* (17.5–40.5), *C. herbarum* (0.8–53.6), and *Penicillium aurantiogriseum* (6.5–32.4). Most other species were scarce, with frequencies of occurrence not exceeding 7.1%.

Keywords: fungi, micromycetes, aeromycota, biodiversity, libraries, written heritage