

АНТРОПОГЕННАЯ ИНВАЗИЯ МИКРОМИЦЕТОВ В НЕНАРУШЕННЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНН (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

© 2020 Власов Д.Ю.^{a, b, *}, Кирцидели И.Ю.^b, Абакумов Е.В.^a, Новожилов Ю.К.^b,
Зеленская М.С.^a, Баранцевич Е.П.^c

^a ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
Санкт-Петербург, 199034, Россия

^b ФГБУН Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук,
Санкт-Петербург, 197376, Россия

^c Северо-Западный федеральный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова Министерства
здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, 197341, Россия
e-mail: *Dmitry.Vlasov@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2019. После доработки 04.04.2020. Принята к публикации 07.05.2020.

Vlasov D.Yu., <http://orcid.org/0000-0002-0455-1462>; Kirtsideli I.Yu., <http://orcid.org/0000-0002-4736-2485>;
Abakumov E.V. <http://orcid.org/0000-0002-5248-9018>; Novozhilov Yu.K., <http://orcid.org/0000-0001-8875-2263>;
Zelenskaya M.S., <http://orcid.org/0000-0003-3588-8583>; Barantsevich E.P., <http://orcid.org/0000-0002-4800-3345>

Станция Прогресс является крупнейшей российской антарктической станцией. Антропогенное влияние на первичные почвы в районе этой станции отражается на химической структуре почв и структуре микробных сообществ. В статье показано многократное увеличение количества микроорганизмов (особенно микроскопических грибов) в загрязнённых почвах вокруг станции Прогресс. Антропогенное воздействие изменяет структуру комплексов почвенных микроорганизмов. Доля мезофильных микроорганизмов при этом существенно увеличивается. В образцах первичных почв и антропогенных субстратов было идентифицировано 53 вида микромицетов из 28 родов. Их разнообразие уменьшается от антропогенных почв и антропогенных субстратов до контрольных (чистых) почв. Показано, что увеличение количества микромицетов в районе полярной станции является результатом инвазии новых видов, связанных с присутствием человека. Некоторые аборигенные виды микромицетов способны адаптироваться к антропогенным субстратам и могут быть деструкторами привнесённых материалов. Среди микромицетов из загрязнённых почв и антропогенных субстратов более 56% и 70%, соответственно, могут быть отнесены к условным патогенам человека. Таким образом, инвазивные процессы изменяют структуру комплексов почвенных микромицетов, что может служить индикатором антропогенного воздействия на экосистемы в оазисе Холмы Ларсеманн Восточной Антарктиды.

Ключевые слова: антарктические экосистемы, антропогенное влияние, микроскопические грибы, инвазивные виды, микобиота почв, условные патогены.

Введение

Деятельность человека в районах полярных станций в Антарктике сопровождается изменением природных комплексов, сформированных в суровых экологических условиях. Микроорганизмы, составляющие основу антарктических экосистем, перемещаются на большие расстояния с воздушными потоками, переносятся морской водой, но главное – могут распространяться человеком вместе с различными материалами. Масштабы ан-

тропогенной инвазии микроорганизмов в Антарктику изучены недостаточно. В связи с этим большой интерес представляет сравнительное изучение микробных сообществ в естественных и антропогенно изменённых местообитаниях.

Исследования антарктической микробиоты за последние три десятилетия значительно расширили знания о разнообразии и роли микроорганизмов в экстремальных условиях Антарктики. Это в полной мере относится и к

микроскопическим грибам (микромикетам). Повышенный интерес учёных к изучению антарктической микобиоты во многом обусловлен тем, что микромикеты весьма адаптированы к суровым климатическим условиям, а структура сообществ грибов является чувствительным индикатором изменения экосистем Антарктиды в тех районах, которые подвергаются антропогенному воздействию. Загрязнение воздуха, разлив топлива, сброс отходов и сточных вод вызывают заметные изменения экологической и санитарной обстановки в районах полярных станций [Waterhouse, 2001]. При этом микроскопические грибы проявляют способность заселять различные субстраты (как природные, так и антропогенные), а благодаря своей высокой ферментативной активности, использовать в качестве источников питания широкий спектр соединений различной химической природы. Наконец, состав и количество микромикетов оказывают непосредственное влияние на среду обитания человека на полярных станциях.

Известно, что распространение микроорганизмов в антарктических экосистемах ограничивается рядом факторов (низкая влажность, низкие температуры воздуха, высокий уровень УФ-излучения, недоступность питательных веществ и др.). Однако их расселению может способствовать человек [Власов и др., 2012; Зеленская и др., 2013; Кирцидели и др., 2014, 2016]. Вместе с привнесёнными материалами, продуктами питания и другими возможными субстратами в экосистемы Антарктики могут попадать новые виды микромикетов, которые обычно окружают человека. Их появление способно значительно влиять на структуру антарктических микробных сообществ. Это особенно заметно в отношении микобиоты почв на территории полярных станций [Bargagli, 2008]. В целом инвазии микромикетов в природные экосистемы изучены недостаточно. В России в этой области известны несколько работ, посвящённых микоризообразующим и фитопатогенным грибам [Веселкин, Прокина, 2016; Селиховкин и др., 2018].

Исследования последних лет показывают, что в примитивных почвах прибрежных районов Антарктиды преобладают представители

Ascomycota [Arenz, Blanchette, 2011; Zumsteg et al., 2012; Pudasaini et al., 2017]. В то же время в наиболее экстремальных условиях (в континентальной части Антарктиды) чаще встречаются базидиальные дрожжи [Onofri et al., 2007]. Наиболее распространёнными в Антарктике являются виды родов *Antarctomyces*, *Cadophora*, *Cladophialophora*, *Cladosporium*, *Cylindrocarpon*, *Geomyces*, *Geotrichum*, *Goffeazyma*, *Glomerella*, *Golovinomyces*, *Hypophozyma*, *Penicillium*, *Phoma*, *Rhodotorula*, *Thelebolus* [Tosi et al., 2002; de Hoog et al., 2004; Arenz et al., 2006; Connell et al., 2006; Lai et al., 2007; Brunati et al., 2009; Loque et al., 2010; Arenz, Blanchette 2011; Singh et al., 2011; Santiago et al., 2015; Marfenina et al., 2016; Nikitin et al., 2017]. Низкое разнообразие и численность представителей *Zygomycota*, вероятно, связаны с неустойчивостью клеток этих организмов к низким температурам [Frisvad, 2008; Maggi et al., 2013]. В нескольких работах отмечалось влияние антропогенного загрязнения на микобиоту первичных почв, а также приводились сведения о встречаемости микромикетов на антропогенных материалах [Duncan et al., 2006; Kochkina et al., 2014]. В наших предшествующих исследованиях антропогенная инвазия микромикетов в полярные экосистемы была показана для ряда регионов Арктики, а также нескольких районов Антарктиды (полярные станции Беллинзгаузен и Мирный).

Цель данной работы – изучить биоразнообразие микромикетов в первичных почвах и на антропогенных субстратах в районе станции Прогресс (крупнейшей российской станции в Антарктиде) и выявить предположительно инвазивные виды, известные как условные патогены человека и деструкторы различных материалов.

Материал и методы

Материал для исследования был собран в 2006–2015 гг. во время сезонных работ Российской антарктической экспедиции в районе российской круглогодичной станции Прогресс, которая была открыта в 1989 г. Станция расположена на восточном берегу бухты Тюленья залива Прюдс в точке с ко-

ординатами 69°22'30" ю. ш. и 76°23'30" в. д. Оазис Холмы Ларсеманн представляет собой значительную территорию обнажённых скал (рис. 1). Лишь локально на них формируется мохово-лишайниковый покров. Сооружения станции размещены между холмами и береговой линией залива Прюдс. Станция Прогресс является важным транспортным узлом Антарктиды. Недалеко от неё находится китайская антарктическая станция Чжуншань и индийская исследовательская станция Бхарати. Климатические условия здесь менее суровы по сравнению с ближайшими береговыми станциями.

Антропогенные субстраты и загрязнённые первичные почвы были собраны на территории станции Прогресс в местах разливов нефти, выбросов мусора и рекреационных зонах. В качестве антропогенных материалов были исследованы полиэтиленовые пакеты, металлические изделия, покрытые краской, целлюлозосодержащие субстраты (бумага, картон, ДСП, ткань, древесина), которые по-

пали во внешнюю среду и были найдены на территории станции, а также на некотором удалении от неё. Выделение микроскопических грибов из этих субстратов проводилось прямым посевом на питательную среду мелких фрагментов материалов. В некоторых случаях использовали смывы с поверхности антропогенных субстратов, для чего фрагменты материалов помещали в колбы со стерильной водой, встряхивали в течение 20 минут, после чего 1 мл полученной суспензии переносили на питательную среду.

Контрольные (чистые) образцы первичных почв были взяты на территории оазиса Холмы Ларсеманн в местах, наиболее удалённых от станции и непосещаемых людьми. Каждый образец представлял собой усреднённую пробу, то есть почву отбирали из 5 точек на расстоянии примерно 2–2.5 м (метод конверта) с глубины 0–5 см. Все образцы были собраны в стерильные контейнеры и помещены в охлаждающую камеру (–18 °С), где они хранились в течение 5 месяцев.



Рис. 1. Оазис Холмы Ларсеманн. Район проведения исследований.

Таблица 1. Основные свойства почв из района расположения российской станции Прогресс

Характеристика мест отбора почвенных проб	Органический углерод (%)	N, %	Сгк/Сфк*	Сгк/Собщ**	pH, ед	Скелетная фракция гран. состава %	Мелкозём %	ПАУ (сумма) мг/г	Бензапирен мг/г
Антропогенно загрязнённые почвы на территории станции Прогресс	0.59	0.04	0.04	0.04	7.2	67	33	40.5	2.2
Контрольные (чистые) почвы на территории оазиса Холмы Ларсеманна	0.45	0.05	0.24	0.17	7.0	80	20	20.5	0.13

* Сгк/Сфк – характеризует тип гумуса (по соотношению углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот)

**Сгк/Собщ – характеризует степень или глубину гумификации органического вещества

Антропогенное влияние на первичные почвы в районе этой станции отражается на химическом составе почв [Абакумов и др., 2014]. Так, содержание полициклических ароматических углеводородов в загрязнённых почвах практически в 2 раза выше, чем в контрольных (табл. 1). Существенные различия отмечены и по фракционному составу почв.

Выделение микроорганизмов из почв проводили стандартными микробиологическими методами [Звягинцев, 1991]. Изолированные из почвы микромицеты культивировали на агаризованной среде Чапека при температуре 4–5, 20 и 36.5 °С, а их идентификацию осуществляли после споруляции с использованием световой микроскопии и стандартных определителей. Штаммы грибов поддерживали в чистой культуре на агаре Чапека.

Часть изолятов грибов (дрожжи и стерильный мицелий) была идентифицирована молекулярными методами. Регион ДНК, содержащий внутренние транскрибируемые спейсеры ITS1 и ITS2, амплифицировали с помощью праймеров ITS-1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') и ITS-4 (5'-TCCTCCGCTTATGATATGC-3'). Амплифицированные фрагменты ДНК очищали на колонках CentriSep Column, а затем секвенировали на генетическом анализаторе ABI 3130 с использованием набора BigDye Terminator v1.1 cycle sequencing kit. Полученные нуклеотидные последовательности

сравнивали при помощи программы BLAST с нуклеотидными последовательностями, имеющимися в открытой базе данных на сайте NCBI [Пестова и др., 2011]. Название и положение таксонов были унифицированы с использованием базы данных [Index Fungorum, 2020].

Численность микроорганизмов оценивали на нескольких питательных средах (промышленных) при температуре +9 °С: агаре с экстрактом говядины (общее микробное число органотрофных бактерий), крахмало-аммиачном агаре (актиномицеты), агаре Чапека (микромицеты), среде Эшби (аэробные азотфиксирующие бактерии). Кроме того готовили специальную среду для выделения микроорганизмов, утилизирующих углеводороды нефти – водный агар с добавлением 1% мазута. Указанные группы микроорганизмов наиболее полно отражают микробиологическую компоненту грунтов в районах антарктических полярных станций [Тешебаев и др., 2016].

Для оценки ожидаемого числа видов в области исследования мы использовали подход, основанный на алгоритме генерации выборки [Colwell et al., 2012]. В основе этого подхода лежит конструирование кривой разрежения (rarefaction curve) с помощью специального алгоритма случайной многократной перестановки данных в пределах выборок из числа обнаруженных изолятов. Данная кривая является функцией математического ожидания

видовой насыщенности $S(N)$ при увеличении численности сообщества. Разрежение даёт возможность найти предполагаемое число видов для любой промежуточной совокупности из N особей, считая её случайной и независимой выборкой из всей генеральной совокупности. Эмпирические данные о числе видов при построении этой кривой сглаживаются параметрической модельной зависимостью с последующей экстраполяцией к некоторой асимптоте «насыщения» [Шитиков и др., 2011].

Для расчёта ожидаемого числа видов в генеральной совокупности, из которой была сделана выборка, использовался скорректированный индекс Chao1 (индекс с поправкой на смещение), который рассчитывался на основе регистрации количества видов, представленных одним изолятом. Для этого расчёта использовалась некоммерческая программа «EstimateS 9.10» [Colwell et al., 2012].

При сопоставлении полученных видовых списков был использован коэффициент Серенсена, рассчитанный для сравниваемых типов местообитаний по формуле $K_s = 2c/a+b$, где a – количество видов для первого типа местообитаний, b – количество видов для второго типа местообитаний, c – количество общих видов.

Результаты и обсуждение

Количество микроорганизмов в первичных почвах в районе антарктической станции Прогресс варьирует от нескольких сотен до нескольких миллионов клеток бактерий и от единичных колониеобразующих единиц (КОЕ) до 13 000 КОЕ для микроскопических грибов (рис. 2). Данные показывают многократное увеличение численности микроорганизмов в почвах, подвергающихся антропогенному загрязнению. Общее количество органотрофных бактерий, а также микроицетов в антропогенно загрязнённых почвах было на 2 порядка выше, чем на контрольных участках. Такая же картина отмечена и для азотфиксирующих бактерий. Относительно близкие показатели численности на сравниваемых территориях были зафиксированы только для микроорганизмов, изолированных на водный агар с нефтью.

Установлено, что загрязнение почвы существенно влияет на соотношение микроорганизмов, развивающихся при разных температурах. Количество микроорганизмов, способных расти при 4–5 °С (психрофильные микроорганизмы), составляет более 60% для контрольных почв и только 9% для антропогенно загрязнённых почв. Группа мезофильных микроорганизмов, хорошо развиваю-

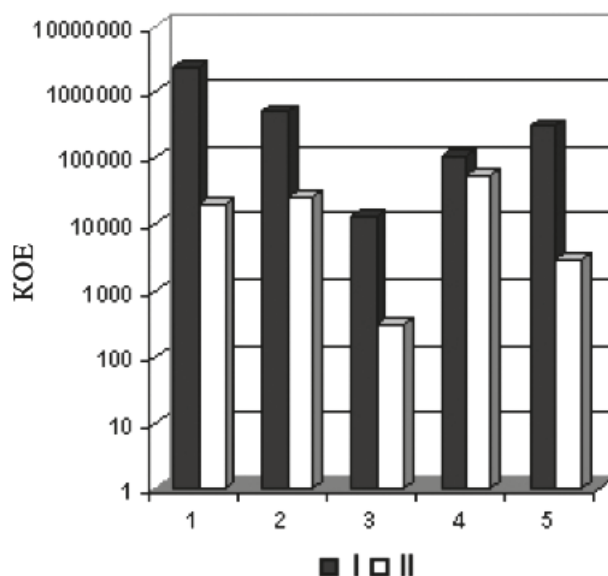


Рис. 2. Численность культивируемых микроорганизмов в почвах (КОЕ/1г) при выделении на различные питательные среды при температуре +9 °С: 1 – агаризованный говяжий экстракт; 2 – крахмало-аммиачный агар; 3 – агаризованная среда Чапека; 4 – водный агар с 1% мазута; 5 – среда Эшби. I – антропогенно загрязнённые почвы; II – контрольные почвы.

Таблица 2. Видовой состав и количество изолятов микромицетов, выделенных из различных местообитаний в оазисе Холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида

Виды грибов	Типы местообитаний		
	Антропогенные субстраты	Загрязнённые почвы	Контрольные почвы
<i>Acremonium alternatum</i> Link	0	4	0
<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl	22	8	0
<i>Antarctomyces psychrotrophicus</i> Stchigel & Guarro*	0	1	2
<i>Aspergillus flavus</i> Link	5	2	0
<i>A. niger</i> Tiegh.	4	0	0
<i>A. pseudoglaucus</i> (Blochwitz) Malloch & Cain	0	1	0
<i>A. ustus</i> (Bainier) Thom & Church	5	0	0
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud	12	7	8
<i>Cadophora malorum</i> (Kidd & Beaumont) W. Gams*	0	3	9
<i>Cephalotrichum microsporum</i> (Sacc.) P.M. Kirk	2	1	0
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze*	3	0	0
<i>Chrysosporium merdarium</i> (Ehrenb.) J.W. Carmich.	0	0	1
<i>Chloridium</i> sp.	0	2	0
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries	17	4	0
<i>C. herbarum</i> (Pers.) Link	2	0	0
<i>C. sphaerospermum</i> Penz.	2	0	0
<i>Coniosporium</i> sp.	0	0	1
<i>Clonostachys rosea</i> (Link) Schroers, Samuels, Seifert & W. Gams	0	0	2
<i>Hormonema</i> sp.	4	2	0
<i>Geomyces vinaceus</i> Dal Vesco	2	0	0
<i>Metarhizium viride</i> (Segretain, Fromentin, Destombes, Brygoo & Dodin ex Samson) Kepler, Rehner & Humber	2	1	2
<i>Mortierella elongata</i> Linnem.	0	4	3
<i>Mucor hiemalis</i> Wehmer	4	0	0
<i>M. circinelloides</i> Tiegh	0	1	0
<i>Monodictys levis</i> (Wiltshire) S. Hughes	0	0	2
<i>Isaria farinosa</i> (Holmsk.) Fr.	0	2	5
<i>Penicillium aurantiogriseum</i> Dierckx	7	12	0
<i>P. camemberti</i> Thom	0	1	0
<i>P. canescens</i> Sopp	11	7	0
<i>P. citrinum</i> Thom	3	0	0
<i>P. commune</i> Thom	12	0	0
<i>P. corylophilum</i> Dierckx	4	5	0
<i>P. decumbens</i> Thom	7	1	0
<i>P. expansum</i> Link	14	5	6
<i>P. glabrum</i> (Wehmer) Westling	1	1	3
<i>P. herquei</i> Bainier & Sartory	0	5	0
<i>P. implicatum</i> Biourge	0	0	1

<i>P. lanosum</i> Westling	2	8	6
<i>P. waksmanii</i> K.M. Zaleski	0	1	0
<i>P. verrucosum</i> Dierckx	0	1	0
<i>Phoma herbarum</i> Westend.	9	12	11
<i>Phoma</i> sp.	13	0	0
<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D.L. Lindner (<i>Geomyces pannorum</i> (Link) Sigler & J.W. Carmich.)	7	21	32
<i>Rhizopus stolonifer</i> (Ehrenb.) Vuill.	6	2	0
<i>Rodotorula diobovata</i> (S.Y.Newell & I.L.Hunter) O.M.Wang, F.Y.Bai, M.Groenew*	4	1	7
<i>Rodotorula</i> sp.	0	1	0
<i>Sarcinomyces</i> sp.*	0	0	1
<i>Scytalidium lignicola</i> Pesante	0	1	0
<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.	2	9	12
<i>Trichoderma viride</i> Pers.	2	3	0
<i>T. harzianum</i> Rifai	0	4	0
<i>Trichurus spiralis</i> Hasselbr.	0	2	0
<i>Ulocladium consortiale</i> (Thüm.) E.G. Simmons	7	11	0
<i>Wardomyces inflatus</i> (Marchal) Hennebert	0	5	0

* – Идентифицированы с использованием молекулярных методов.

щихся при 20 °С, составляет более 83% для загрязнённых почв и 30% для контрольных. Интересно отметить, что термотолерантные микроорганизмы, способные развиваться при 36.5 °С и выше, составили 7.3% для почв с антропогенным загрязнением.

В результате микологического анализа образцов первичных почв в районе станции Прогресс всего было идентифицировано 53 вида микромицетов из 28 родов (табл. 2). Отдел *Ascomycota* был представлен наиболее широко (48 видов). Только виды родов *Chaetomium* и *Thelebolus* сформировали телеоморфную (половую) стадию в условиях чистой культуры. Другие представители *Ascomycota* развивались в анаморфной (бесполой) стадии. Отдел *Zygomycota* был представлен 4 видами, а *Basidiomycota* только 1 видом.

Из загрязнённых почв выделено 38 видов микромицетов (162 изолята), тогда как в контрольных почвах выявлено всего 19 видов (114 изолятов). На антропогенных субстратах зарегистрирован 31 вид микромицетов (197 изолятов), причём 10 из них более нигде не отмечены. Указанное число изолятов характеризует количество колоний, выросших при посеве из всех образцов определённого типа (антропогенные субстраты, загрязнённые почвы, контрольные почвы).

Интересно отметить, что такие виды, как *Alternaria alternata*, *Aspergillus* spp., *Cladosporium cladosporioides*, *Rhizopus stolonifer*, *Trichoderma* spp., *Ulocladium consortiale* и 10 из 14 видов рода *Penicillium* были отмечены как на антропогенных субстратах, так и в загрязнённых почвах, но не были обнаружены в контрольных почвах. Этот факт указывает на возможную антропогенную инвазию этих видов. Такие виды, как *Aureobasidium pullulans*, *Cadophora malorum*, *Pseudogymnoascus pannorum*, *Phoma herbarum*, *Rodotorula diobovata* и *Thelebolus microsporus* чаще выделялись из контрольных почв. Они могут быть отнесены к типичным обитателям первичных почв на исследуемой территории, что частично согласуется с известными сведениями по микобиоте других районов Антарктиды [Arenz et al., 2006; Connell et al., 2006]. По нашим данным перечисленные виды способны развиваться и на антропогенных субстратах, а также встречаются (с высокой частотой) в загрязнённых почвах, что указывает на их ведущую роль в комплексах микромицетов всех изученных местообитаний.

Почти 40% всех идентифицированных видов были обнаружены как на антропогенных субстратах, так и в загрязнённых почвах. Коэффициент сходства Серенсена для этих

типов местообитаний (K_s) = 0.6, тогда как при сравнении микобиоты антропогенных субстратов и контрольных почв этот показатель был почти в 2 раза ниже ($K_s = 0.32$). Лишь 4 вида (8%) одновременно отмечены в контрольных и загрязнённых почвах (не отмечены на антропогенных субстратах), тогда как ещё 9 видов (17%) отмечены во всех типах местообитаний. Среди них выделяется *Pseudogymnoascus pannorum*, который можно рассматривать в качестве явного доминанта в почвах изученной территории. Лишь 6 видов микромицетов зарегистрированы только в контрольных почвах. При этом они были представлены единичными изолятами. Этот факт подтверждает известные сведения о бедности микобиоты первичных почв ненарушенных антарктических экосистем.

Как видно из полученных значений индекса Chao1, рассчитанных для кривых накопления видов (рис. 3), мы выявили практически все ожидаемые виды, обитающие на антропогенных субстратах ($Chao1 = 31 \pm 0.06$), а также в контрольных почвах ($Chao1 = 20.2 \pm 1.24$). Видовой состав грибов в меньшей степени выявлен на загрязнённых почвах ($Chao1 = 46.43 \pm 7.26$).

Выявленное распределение указывает на высокую связь микобиоты загрязнённых почв и антропогенных субстратов. Контрольные почвы существенно отличаются от загрязнённых территорий по составу и структуре микобиоты. Можно предположить, что значительная часть привнесённых человеком микромицетов попадает в почву и сохраняет там свою жизнеспособность. Прежде всего это относится к видам родов *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Penicillium* и *Ulocladium*. Дальнейшее расселение этих грибов может зависеть от адаптационных способностей конкретных видов, а также наличия питательных субстратов в окружающей среде. Стоит отметить, что большинство микромицетов, которые мы рассматриваем как инвазивные, известны своей способностью развиваться в широком диапазоне внешних условий. Среди видов, выделенных из антропогенно загрязнённых почв и антропогенных субстратов, более 56% и 70%, соответственно, могут быть отнесены к потенциально патогенным организмам согласно Санитарно-эпидемиологическим правилам [Санитарно-эпидемиологические..., 2008] и другим источникам [Sutton et al., 1998; Simon-Nobbe et al.,

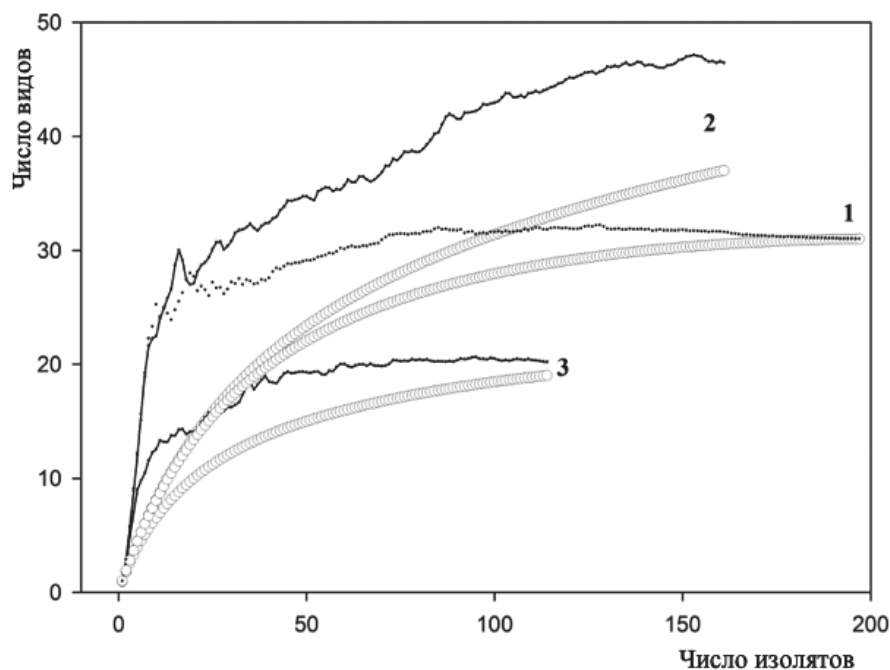


Рис. 3. Результаты полноты выявления видов (бутстреп анализ) в зависимости от количества полученных изолятов. Тонкие линии показывают средние значения индекса Chao1 (ожидаемое количество видов) по мере увеличения количества изолятов, сплошные линии — индивидуальная кривая разрежения в зависимости от количества выделенных изолятов (1 — антропогенные субстраты; 2 — антропогенно загрязнённые почвы; 3 — контрольные почвы).

2008; de Hoog et al., 2009]. Некоторые виды, такие как *Alternaria alternata*, *Chaetomium globosum*, *Cladosporium cladosporioides*, виды родов *Aspergillus* и *Penicillium*, известны как продуценты токсинов, опасных для человека. В умеренном климате эти виды постоянно сопутствуют человеку, поселяются в жилых помещениях с нарушением температурно-влажностного режима, широко распространены в городских почвах [Марфенина, 2005]. Помимо антропогенного переноса, одним из факторов проникновения микроорганизмов в полярные регионы является их перенос птицами [Aislabie et al., 2009]. Птицы часто концентрируются вблизи полярных станций в поисках пищи, а в местах их скопления формируются богатые органическим веществом орнитогенные почвы [Абакумов et al., 2016]. Состав комплексов микромицетов здесь заметно отличается от контрольных почв, но довольно близок к антропогенно загрязнённым почвам. В частности, доминирующим по числу видов здесь является род *Penicillium*.

Результаты работы указывают на необходимость микробиологического мониторинга территорий полярных станций с целью выявления путей циркуляции условно патогенных микроорганизмов и оценки их возможного влияния на здоровье полярников.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии антропогенного фактора на формирование микробиоты первичных почв в районе российской антарктической станции Прогресс. Выявлено значительное совпадение видового состава микромицетов на антропогенных (привнесённых) материалах и в почвах в районе станции. Влияние на микробиоту почв выражается в значительном изменении структуры комплексов микромицетов. В контрольных («чистых») почвах состав микромицетов достаточно беден, преобладают психрофильные виды. Почти треть выявленных здесь видов не была отмечена на загрязнённых территориях и антропогенных субстратах. В то же время мезофильные виды, характеризующиеся широкой экологической амплитудой,

преобладают в антропогенно загрязнённых почвах. Очевидно, что чужеродные виды микромицетов, благодаря своему адаптационному потенциалу, способны приспосабливаться к местным условиям. Численность КОЕ грибов в почвах на территории станции Прогресс значительно увеличивается по сравнению с контрольными (чистыми) почвами. Это явление, скорее всего, может быть результатом увеличения количества спор, попадающих в загрязнённую почву с антропогенных субстратов (выявленные виды известны активным спорообразованием), а также развитием и спороношением грибов непосредственно в загрязнённой почве. Возможно, что значительная часть чужеродных видов микромицетов не участвует в почвенных процессах, а только сохраняет жизнеспособность в почвах, поскольку некоторые грибы выявляются в почвах в виде спор. В орнитогенных почвах вблизи полярных станций состав микромицетов также существенно отличается от контрольных участков, что может быть связано с орнитогенным переносом пропагул микромицетов в антарктические экосистемы. Этот вопрос заслуживает специального исследования.

В целом полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии инвазии микромицетов на структуру почвенной микробиоты антарктических экосистем, а также о необходимости микробиологического мониторинга территорий полярных станций с целью контроля распространения условно патогенных микроорганизмов.

Благодарности

Авторы благодарят коллектив Российской антарктической экспедиции за содействие в проведении исследований.

Финансирование работы

Работа частично поддержана РФФИ (проект 18-04-00900. Орнитогенные почвы Антарктики: формирование, география, биогеохимия и биоиндикация), СПбГУ (Мероприятие 1. Урбанизированные экосистемы Арктического пояса Российской Федерации: динамика, состояние и устойчивое развитие), а также

программой фундаментальных исследований Президиума Российской академии наук (проект «Биоразнообразие природных систем и биологических ресурсов России»).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

Статья не содержит никаких исследований с участием животных в экспериментах, выполненных кем-либо из авторов.

Литература

- Абакумов Е.В., Лодыгин Е.Д., Габов Д.А., Крыленков В.А. Содержание полициклических ароматических углеводов в почвах Антарктиды, на примере Российских полярных станций // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93. № 1. С. 30-35.
- Веселкин Д.В., Прокина Н.Э. Микоризообразование у клёна ясенелистного (*Acer negundo* L.) в градиенте урбанизации // Российский журнал биологических инвазий. 2016. Т. 9. № 1. С. 31-40.
- Власов Д.Ю., Зеленская М.С., Кирцидели И.Ю., Абакумов Е.В., Крыленков В.А., Лукин В.В. Грибы на природных и антропогенных субстратах в западной Антарктике // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46, вып. 1. С. 20-26.
- Звягинцев Д.В. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: МГУ, 1991. 303 с.
- Зеленская М.С., Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Крыленков В.А., Соколов В.Т. Микромицеты – биодеструкторы в биогеоценозах Арктики // Проблемы региональной экологии. 2013. № 5. С. 135-141.
- Кирцидели И.Ю., Абакумов Е.В., Тешебаев Ш.Б., Зеленская М.С., Власов Д.Ю., Крыленков В.А., Рябушева Ю.В., Соколов В.Т., Баранцевич Е.П. Микробные сообщества в районах арктических поселений // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95. № 10. С. 923-929.
- Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Баранцевич Е.П., Крыленков В.А., Соколов В.Т. Комплексы микроскопических грибов в почвах и грунтах полярного острова Известий ЦИК (Карское море) // Микология и фитопатология. 2014. Т. 48, вып. 6. С. 365-371.
- Марфенина О.Е. Антропогенная экология почвенных грибов. М.: Медицина для всех, 2005. 196 с.
- Пестова Н.Е., Баранцевич Н.Е., Рыбкова Н.С., Козлова Н.С., Баранцевич Е.П. Изучение эффективности применения метода секвенирования ДНК по фрагменту гена 16s рРНК для идентификации микроорганизмов // Профилактическая и клиническая медицина. 2011. № 4. С. 57-58.
- Санитарно-эпидемиологические правила СП 1.3.2322-08. Безопасность работы с микроорганизмами III-IV групп патогенности (опасности) и возбудителями паразитарных инфекций. М., 2008. 35 с.
- Селиховкин А.В., Марковская С., Васайтис Р., Мартынов А.Н., Мусолин Д.Л. Фитопатогенный гриб *Fusarium circinatum* и возможности его распространения насекомыми в России // Российский журнал биологических инвазий. 2018. Т. 11. № 2 С. 53-63.
- Тешебаев Ш.Б., Ремнев А.С., Панин А.Л. Микробиологическая компонента грунтов района полевой геологической базы в Антарктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 2. С. 92-100.
- Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Розенберг Г.С. Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели. Тольятти: Кассандра, 2011. 255 с.
- Abakumov E.V., Parnikoza I.Y., Vlasov D.Y., Lupachev A.V. Biogenic-Abiogenic Interaction in Antarctic Ornithogenic Soils // In Biogenic-Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic System. Springer. 2016. P. 237-248. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24987-2_19
- Aislabie J., Jordan S., Ayton J., Klassen J.L., Barker G.M., Turner S. Bacterial diversity associated with ornithogenic soil of the Ross Sea region, Antarctica // Canadian Journal of Microbiology. 2009. Vol. 55. No. 1. P. 21-36. doi: 10.1139/W08-126.
- Arenz B.E., Blanchette R.A. Distribution and abundance of soil fungi in Antarctica at sites on the Peninsula, Ross Sea Region and McMurdo Dry Valleys // Soil Biology and Biochemistry. 2011. Vol. 43. No. 2. P. 308-315. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.10.016.
- Arenz B.E., Held B.W., Jurgens J.A., Farrell R.L., Blanchette R.A. Fungal diversity in soils and historic wood from the Ross Sea Region of Antarctica // Soil Biology and Biochemistry. 2006. Vol. 38. No. 10. P. 3057-3064. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.01.016.
- Bargagli R. Environmental contamination in Antarctic ecosystems // Sci. Total Environ. 2008. No. 400. P. 212-226.
- Brunati M., Rojas J.L., Sponga F., Ciciliato I., Losi D., Göttlich E., de Hoog S., Genilloud O., Marinelli F. Diversity and pharmaceutical screening of fungi from benthic mats of Antarctic lakes // Marine genomics. 2009. Vol. 2. No. 1. P. 43-50. doi: 10.1016/j.margen.2009.04.002.
- Colwell R.K., Chao A., Gotelli N.J., Lin S.Y., Mao C.X., Chazdon R.L., Longino J.T. Models and estimators linking individual-based and sample based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages // J Plant Ecology. 2012. Vol. 5. No. 1. P. 3-21.
- Connell L., Redman R., Craig S., Rodriguez R. Distribution and abundance of fungi in the soils of Taylor Valley, Antarctica // Soil Biology and Biochemistry. 2006. Vol. 38. No. 10. P. 3083-3094. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.02.016
- De Hoog G.S., Gottlich E., Platas G., Genilloud O., Leotta G., Van Brummelen J. Evolution, taxonomy and ecology of the genus *Thelebolus* in Antarctica // Studies in Mycology. 2004. Vol. 51. P. 33-76.
- De Hoog G.S., Guarro J., Gene J., Figueras M.J. Atlas of clinical fungi: the ultimate benchtool for diagnostics. A pilot version of the 3rd ed, CD-ROM. Centraalbureau voor Schimmelcultures, KNAW Fungal Biodiversity Centre / Universitat Rovira i Virgili, Utrecht, Netherlands. 2009. 1126 p.

- Duncan S.M., Farrell R.L., Thwaites J.M., Held B.W., Arenz B.E., Jurgens J.A., Blanchette R.A. Endoglucanase producing fungi isolated from Cape Evans historic expedition hut on Ross Island, Antarctica // *Environmental Microbiology*. 2006. Vol. 8. No. 7. P. 1212–1219. doi: 10.1111/j.1462-2920.2006.01013.x.
- Frisvad J.C. Fungi in cold ecosystems. In *Psychrophiles: from biodiversity to biotechnology*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. P. 137–156.
- Index Fungorum. 2020 // (<http://www.indexfungorum.org>). Проверено 01.03.2020.
- Kochkina G.A., Ozerskaya S.M., Ivanushkina N.E., Chigineva N.I., Vasilenko O.V., Spirina E.V., Gilichinsky D.A. Fungal Diversity in the Antarctic Active Layer // *Microbiology*. 2014. Vol. 83. No. 1–2. P. 94–101. doi: 10.1134/S002626171402012X.
- Lai X., Cao L., Tan H., Fang S., Huang Y., Zhou S. Fungal communities from methane hydrate-bearing deep-sea marine sediments in South China Sea // *The ISME Journal*. 2007. Vol. 1. No. 8. P. 756–762.
- Loque C.P., Medeiros A.O., Pellizzari F.M., Oliveira E.C., Rosa C.A., Rosa L.H. Fungal community associated with marine macroalgae from Antarctica // *Polar Biology*. 2010. Vol. 33. No. 5. P. 641–648. doi: 10.1007/s00300-009-0740-0.
- Maggi O., Tosi S., Angelova M., Lagostina E., Fabbri A.A., Pecoraro L., Altobelli E., Picco A.M., Savino E., Branda E., Turchetti B. Adaptation of fungi, including yeasts, to cold environments // *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. 2013. Vol. 147. No. 1. P. 247–258. doi: 10.1080/11263504.2012.753135.
- Marfenina O.E., Nikitin D.A., Ivanova A.E. The structure of fungal biomass and diversity of cultivated micromycetes in Antarctic soils (progress and Russkaya Stations) // *Eurasian Soil Science*. 2016. Vol. 49. No. 8. P. 934–941. DOI: 10.1134/S106422931608007X.
- Nikitin D.A., Marfenina O.E., Kudinova A.G., Lysak L.V., Mergelov N.S., Dolgikh A.V., Lupachev A.V. Microbial biomass and biological activity of soils and soil-like bodies in coastal oases of Antarctica // *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50. No. 9. P. 1086–1097. DOI: 10.1134/S1064229317070079.
- Onofri S., Selbmann L., De Hoog G.S., Grube M., Barreca D., Ruisi S., Zucchini L. Evolution and adaptation of fungi at boundaries of life // *Advances in Space Research*. 2007. Vol. 40. No. 11. P. 1657–1664. doi: 10.1016/j.asr.2007.06.004.
- Pudasaini S., Wilson J., Ji M., van Dorst J., Snape I., Palmer A.S., Burns B.P., Ferrari B.C. Microbial Diversity of Browning Peninsula, Eastern Antarctica Revealed Using Molecular and Cultivation Methods // *Frontiers in microbiology*. 2017. Vol. 8. doi: 10.3389/fmicb.2017.00591
- Santiago I.F., Soares M.A., Rosa C.A., Rosa L.H. Lichenosphere: a protected natural microhabitat of the non-lichenised fungal communities living in extreme environments of Antarctica // *Extremophiles*. 2015. Vol. 19. No. 6. P. 1087–1097. doi: 10.1007/s00792-015-0781-y.
- Simon-Nobbe B., Denk U., Poll V., Rid R., Breitenbach M. The spectrum of fungal allergy // *Allergy and Immunology*. 2008. No. 145. P. 58–86.
- Singh J., Dubey A.K., Singh R.P. Antarctic terrestrial ecosystem and role of pigments in enhanced UV-B radiations // *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2011. Vol. 10. No. 1. P. 63–77. doi: 10.1007/s11157-010-9226-3.
- Sutton D.A., Fothergill A.W., Rinaldi M.G. *Guide to Clinically Significant Fungi*. Williams & Wilkins, Baltimore, USA, 1998. 471 p.
- Tosi S., Casado B., Gerdol R., Caretta G. Fungi isolated from Antarctic mosses // *Polar Biol*. 2002. Vol. 25. No. 4. P. 262–268. doi: 10.1007/s00300-001-0337-8.
- Waterhouse E.J. *Ross Sea Region: A state of the environment report for the Ross Sea region of Antarctica*. Christchurch: New Zealand Antarctic Institute, 2001. 267 p.
- Zumsteg A., Luster J., Göransson H., Smittenberg R.H., Brunner I., Bernasconi S.M., Zeyer J., Frey B. Bacterial, archaeal and fungal succession in the forefield of a receding glacier // *Microbial ecology*. 2012. Vol. 63. No. 3. P. 552–564. doi:10.1007/s00248-011-9991-8.

ANTHROPOGENIC INVASION OF MICROMYCETES TO UNDESTURBED ECOSYSTEMS OF LARSEMANN HILLS OASIS (EAST ANTARCTICA)

© 2020 Vlasov D.Yu.^{a,b,*}, Kirtsideli I.Yu.^b, Abakumov E.V.^a, Novozhilov Yu.K.^b,
Zelenskaya M.S.^a, Barantsevich E.P.^c

^a Saint Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia

^b Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 197376, Russia

^c Northwestern Almazov Federal Medical Research Center of the Russian Federation Ministry of Health,
St. Petersburg, 197341, Russia
e-mail: *Dmitry.Vlasov@mail.ru

Antarctic station Progress is the largest Russian Antarctic station. The anthropogenic impact on primary soils in the area of this station is reflected in the chemical structure of soils and the structure of microbial communities. The article shows a multiple increase in the number of microorganisms (especially microscopic fungi) in contaminated soils around the Progress station. Anthropogenic impact changes the structure of complexes of soil microorganisms. The percentage of mesophilic microorganisms increases significantly. In the samples of primary soils and anthropogenic substrates, 53 species of micromycetes from 28 genera were identified. Their diversity decreases from anthropogenic soils and anthropogenic substrates to control soils. It was shown that an increase in the number of species on the polar station area is the result of the invasion of new species of micromycetes connected with human activity. Some native species of micromycetes are able to adapt to anthropogenic substrates and can be destructors of different materials. Among micromycetes from polluted soils and anthropogenic substances, more than 56% and 70%, respectively, can be referred to potentially pathogenic species. Thus, the invasive processes change the structure of micromycetes complexes in soil, which can serve as an indicator of anthropogenic impact on ecosystems in the Larsemann Hills oasis of East Antarctica.

Keywords: Antarctic ecosystems, anthropogenic influence, microscopic fungi, invasive species, soil microbiota, potential pathogens.