

Оценка антропогенного влияния на микобиоту Антарктики в районах российских полярных станций

И. Ю. КИРЦИДЕЛИ¹, Д. Ю. ВЛАСОВ^{1,2}, Ю. К. НОВОЖИЛОВ¹, Е. В. АБАКУМОВ², Е. П. БАРАНЦЕВИЧ³

¹ Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 2
E-mail: microfungi@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

³ Северо-Западный федеральный медицинский исследовательский центр
им. В. А. Алмазова Министерства здравоохранения РФ
197341, Санкт-Петербург, ул. Акуратова, 2

Статья поступила 05.02.2018

Принята к печати 03.04.2018

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты исследования комплексов микроскопических грибов в районах пяти Российских полярных станций в Восточной Антарктиде и Субантарктике. Всего выявлено 104 вида микроскопических грибов. В пробах почв и антропогенных материалов из Восточной Антарктиды (станции Прогресс, Мирный, Молодежная, Дружная-4) микологическими методами выявлено 77 видов грибов, тогда как из района станции Беллинсгаузен (Субантарктика) выделено 87 видов микромицетов. Численность грибов в почвах колебалась от единичных пропагул в контрольных почвах до 94 тыс. на 1 г почвы на загрязненных территориях. Наибольшим числом видов представлен род *Penicillium* (26 видов). Выявлены виды грибов, составляющие ядро микобиоты в большинстве изученных местообитаний. Для почв Восточной Антарктиды оно сформировано видами родов *Aureobasidium*, *Cadophora*, *Pseudogymnoascus* (*Geomyces*), *Thelebolus*, *Phoma*. Установлены значительные различия микобиоты Восточной Антарктиды и Субантарктики. Отмечена общая тенденция возрастания видового разнообразия и численности грибов в районах полярных станций в сравнении с контрольными (чистыми) участками для всех обследованных территорий. Полученные данные свидетельствуют о том, что значительная часть микромицетов попадает в Антарктику вместе с человеком (антропогенная инвазия).

Ключевые слова: микроскопические грибы, Антарктика, антропогенное воздействие, антропогенные субстраты, микробное сообщество, микобиота, почва.

Несмотря на накопленные знания о загрязнении окружающей среды, сведения об антропогенном влиянии на антарктические экосистемы весьма ограничены. Из-за геогра-

фической изоляции и трудных условий для жизни, антарктический континент практически не испытывал влияния человека до XX в. Даже сегодня Антарктида используется в

основном в качестве “научной лаборатории”. Континент пока относительно слабо затронут антропогенным воздействием, но не может рассматриваться как исключение из общей тенденции загрязнения окружающей среды [Waterhouse, 2001]. В настоящее время на территории Антарктиды работает 55 исследовательских станций и более 5 тыс. чел. [Jesus et al., 2015].

Экстремальные условия Антарктиды сформировали уязвимые биоценозы, чувствительные к внешним воздействиям, которые могут особенно серьезно пострадать от загрязняющих веществ на территории станций. Биоремедиация среды в данных экстремальных условиях это крайне медленный, практически не изученный процесс, даже при сравнительно низком уровне загрязнения [Aislabie et al., 2006].

Полихимическое загрязнение почв разделяется на две группы: неорганическое [Водяницкий, 2008] и органическое [Beznosikov, Lodygin, 2010]. Для почв Антарктики загрязнение тяжелыми металлами приобретает все большую значимость, хотя отмечается, что биодоступность токсикантов на данной территории остается невысокой [Claridge et al., 1995; Santos et al., 2005]. По-видимому, наибольшую роль в трансформации химического состава окружающей природной среды здесь играют полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), тяжелые фракции которых являются продуктом сгорания нефтеуглеводородного топлива на дизельных станциях полярных станций [Martins et al., 2010]. В целом загрязнение почв Антарктики является слабоизученным [Абакумов и др., 2014] и требует более точной оценки. В отличие от ПАУ, тяжелые металлы загрязняют почву локально и приурочены в основном к участкам прямой контаминации [Amaro et al., 2015].

Наличие загрязненных нефтепродуктами участков рядом с исследовательскими станциями, например, в районе ст. МакМердо (США), отмечено в ряде работ [Coulon et al., 2004; Yergeau et al., 2009]. Экстремальные условия низких температур окружающей среды в сочетании с низким уровнем испарения, фотоокисления, влажности воздуха, приводят к сохранению органических соеди-

нений в почвах и грунтах в течение многих десятилетий после разлива [Aislabie et al., 2004, 2008]. Исследованию микобиоты Антарктики посвящен целый ряд работ российских и зарубежных исследователей, в частности по исследованию грибов на антропогенно привнесенных материалах [Arenz et al., 2006, 2011; Кирцидели и др., 2010, 2017; Osyczka et al., 2012; Власов и др., 2012]. Кроме того, географическая изоляция и практически стерильная воздушная среда [Duncan et al., 2010] приводят к отсутствию (или, по крайней мере, к ограничению) источников поступления и накопления микроорганизмов (бактерий и микроскопических грибов) в условиях Антарктиды, поэтому антропогенное влияние как фактор распространения микроорганизмов становится особенно актуальным.

В этой связи следует обратить внимание на необходимость комплексных исследований первичных почв и грунтов, подвергающихся антропогенному загрязнению [Bargagli, 2008]. Состав и особенности микробных сообществ могут служить индикаторами состояния и изменения экосистем в высоких широтах [Кирцидели и др., 1999, 2014]. Цель данной работы – исследование изменений комплексов микроскопических грибов в первичных почвах и грунтах Антарктиды под влиянием антропогенного загрязнения, изучение состава и особенностей микробных сообществ в районах российских полярных станций.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал для исследования собран в период 2006–2015 гг. в ходе выполнения научно-исследовательских работ Российской Антарктической экспедиции, организованной Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (табл. 1; рис. 1). Работы проводились в районах расположения ст. Беллинсгаузен (Субантарктика) и четырех российских полярных станций в восточной части Антарктиды. Станция Мирный – первая российская (советская) антарктическая станция, антропогенное влияние на первичные почвы и грунты в районе которой происходит уже в течение более 60 лет.

Характеристика материала исследований

Номер	Точка, станция	Координаты	Климатические особенности*	Период отбора образцов*	Число образцов
1	Беллинсгаузен	62°11' ю. ш., 58°57' з. д.	Средняя годовая температура –2,8 °С. Осадки – до 729 мм	2006–2007 2008–2009 2014–2015	Контрольные почвы – 65, антропогенно загрязненные почвы – 30, привнесенные материалы – 30
2	Молодежная	67°39' ю. ш., 45°50' в. д.	Средняя годовая температура –10,6 °С. Осадки – до 207 мм	2007–2008 2012–2013	Контрольные почвы – 25, антропогенно загрязненные почвы – 20, привнесенные материалы – 18
3	Прогресс	69°24' ю. ш., 76°20' в. д.	Средняя годовая температура –8,5 °С. Осадки – 250 мм	2007–2008 2008–2009 2012–2013 2014–2015	Контрольные почвы – 25, антропогенно загрязненные почвы – 30, привнесенные материалы – 27
4	Дружная-4	69°44' ю. ш., 73°42' в. д.	Близки к условиям ст. Прогресс	2012–2013 2014–2015	Контрольные почвы – 20, антропогенно загрязненные почвы – 20, привнесенные материалы – 16
5	Мирный	66°33' ю. ш., 93°00' в. д.	Среднегодовая температура –11 °С. Осадки – 220 мм	2012–2013 2014–2015	Контрольные почвы – 30, антропогенно загрязненные почвы – 20, привнесенные материалы – 45

* Сезон антарктического лета (декабрь – февраль).

Станция Прогресс – в настоящее время самая крупная российская антарктическая станция. Две другие – Дружная-4 и Молодеж-

ная – в настоящее время являются сезонными. Для этих станций показано, что антропогенное влияние отражается на химическом составе почв [Abakumov, Mukhametova, 2014] (табл. 2).

Антропогенно загрязненные почвы отбирали на территориях станций в местах нефтяных загрязнений, рекреационных воздействий и попадания бытовых отходов. Для контроля отобраны образцы первичных почв и грунтов в районах максимально удаленных от полярных станций, расположенных на территории антарктических оазисов. Пробы грунта объемом 70–100 г отбирали с соблюдением стерильности. Антропогенные материалы включали полиэтилен, металлические изделия, покрытые краской, а также целлюлозосодержащие субстраты (бумага, картон, ДСП, ткань, древесина и т. д.), которые попали во внешнюю среду. Выделение микроорганизмов из почв и грунтов проводили стандартными микробиологическими методами посева частиц грунта на питательные среды

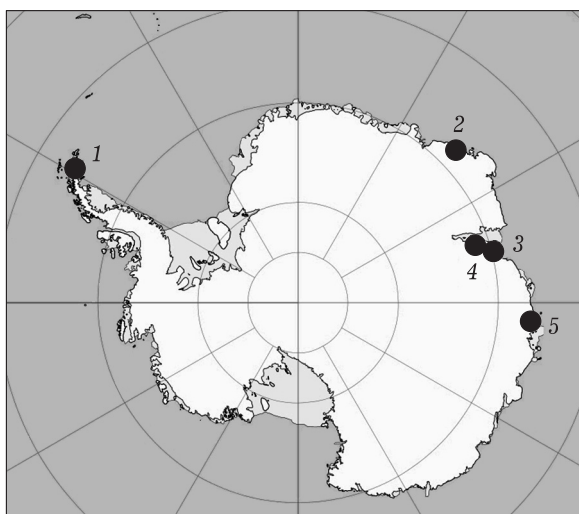


Рис. 1. Районы исследования (станции: 1 – Беллинсгаузен; 2 – Молодежная; 3 – Прогресс; 4 – Дружная-4; 5 – Мирный)

Химический состав почв в районах исследований

Станция	Почва	Органический углерод, %	N, %	$C_{тк}/C_{фк}$	$C_{тк}/C_{обц}$	pH	Скелетная фракция гран состава, %	Мелкозем, %	ПАУ (сумма), нг/г	Бензапирен
Прогресс	Загрязненная	0,59	0,04	0,04	0,04	7,2	67	33	40,5	2,2
	Контрольная	0,45	0,05	0,24	0,17	7,0	80	20	20,5	0,13
Мирный	Загрязненная	2,45	0,13	0,27	0,13	6,8	78	22	90,9	2,3
	Контрольная	8,23	1,20	0,35	0,23	6,9	90	10	54,2	0,82
Молодежная	Загрязненная	0,35	0,08	0,24	—	6,6	43	57	45,8	2,5
	Контрольная	0,25	0,04	0,21	—	5,8	38	62	19,8	2,0
Дружная-4	Загрязненная	0,56	0,05	0,18	—	5,5	49	51	82,5	1,50
	Контрольная	0,21	0,03	0,17	—	4,8	45	55	24,5	0,12
Белингаузен	Загрязненная	3,22	0,29	0,65	—	6,9	35	65	227,2	4,3
	Контрольная	2,56	0,25	0,45	—	6,3	29	71	125,3	1,8

и методом почвенных разведений [Звягинцев, 1991].

Выделение микромицетов из антропогенных материалов осуществляли прямым посевом на питательную среду мелких фрагментов субстрата, а также вытяжек или смывов с поверхности субстратов в различных разведениях. Использовали стандартные среды (среду Чапека, среду Сабуро, МПА, минеральную среду с целлюлозой и картофельно-морковный агар). Инкубацию посевов проводили при температуре 4, 14, 24 и 36,5 °С.

Идентификацию мицелиальных форм микромицетов осуществляли с применением стандартных методик и определителей, в случаях наличия дрожжевых культур или отсутствия спороношения использовали молекулярные методы идентификации.

Образцы ДНК исследуемых грибов секвенировали по регионам D2 и D1/D2 гена 26S РНК, а также по региону ДНК, содержащему внутренние транскрибируемые спейсеры ITS1 и ITS2 [Kurtzman, Robnett, 1998; Hsiao et al., 2005; Li et al., 2007]. Полученные нуклеотидные последовательности сравнивали при помощи программы BLAST с имеющимися в открытой базе данных на сайте NCBI. Названия и положение таксонов унифицировали с использованием базы данных CBS (www.indexfungorum.org/Names/fungi.asp).

Для оценки ожидаемого числа видов в районах изучения, а также полноты исследования использовали подход на основе алгоритма генерации выборок [Colwell et al., 2012]. В его основе лежит конструирование кривой разрежения с помощью специального алгоритма случайной многократной перестановки данных в пределах наборов данных (выборок) из числа обнаруженных изолятов. Данная кривая является функцией математического ожидания видовой насыщенности $S(N)$ при увеличении численности сообщества. Разрежение дает возможность найти предполагаемое число видов для любой промежуточной совокупности из N особей, считая ее случайной и независимой выборкой из всей генеральной совокупности. Эмпирические данные о числе видов при построении этой кривой сглаживаются параметрической мо-

дельной зависимостью с последующей экстраполяцией к некоторой асимптоте “насыщения” [Шитиков и др., 2011].

Для расчета ожидаемого числа видов в генеральной совокупности, из которой сделана выборка, использовали скорректированный индекс Chao1. Его рассчитывали на основе учета числа видов, представленных одним образцом. Для расчета использовали некоммерческую программу EstimateS 9.10 [Colwell, 2014].

Разнообразие видов (альфа-разнообразие) вычисляли с помощью индекса разнообразия Шеннона:

$$H' = -\sum P_i \ln P_i,$$

где P_i – относительная численность определенного вида (доля от общего числа изолятов этого вида) и индекс доминирования Симпсона: $D = 1 / \sum P_i^2$ [Magurran, 2004].

Состав комплексов микроскопических грибов между станциями (для всех изученных местообитаний и субстратов) изучали мето-

дом неметрического многомерного масштабирования (NMDS) на основе расстояний Брея – Кертиса и статистического теста PERMANOVA с 999 перестановками с использованием функций metaMDS и adonis R соответственно. Анализ индикаторных видов выполняли с применением функции multipatt от indicspecies [Cáceres, Legendre, 2009]. Для оценки численности видов адаптирована шкала ACOR [Stephenson et al., 1993]. Графики созданы с помощью программы Sigma-Plot 10.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Всего в ходе микологического анализа образцов материалов, грунта и первичных почв из районов антарктических станций идентифицировано 104 вида микроскопических грибов. Их численность колебалась от нескольких единиц до 5 млн для бактерий (рис. 2) и от единичных пропагул до 94 тыс. на 1 г почвы у грибов. В состав комплексов

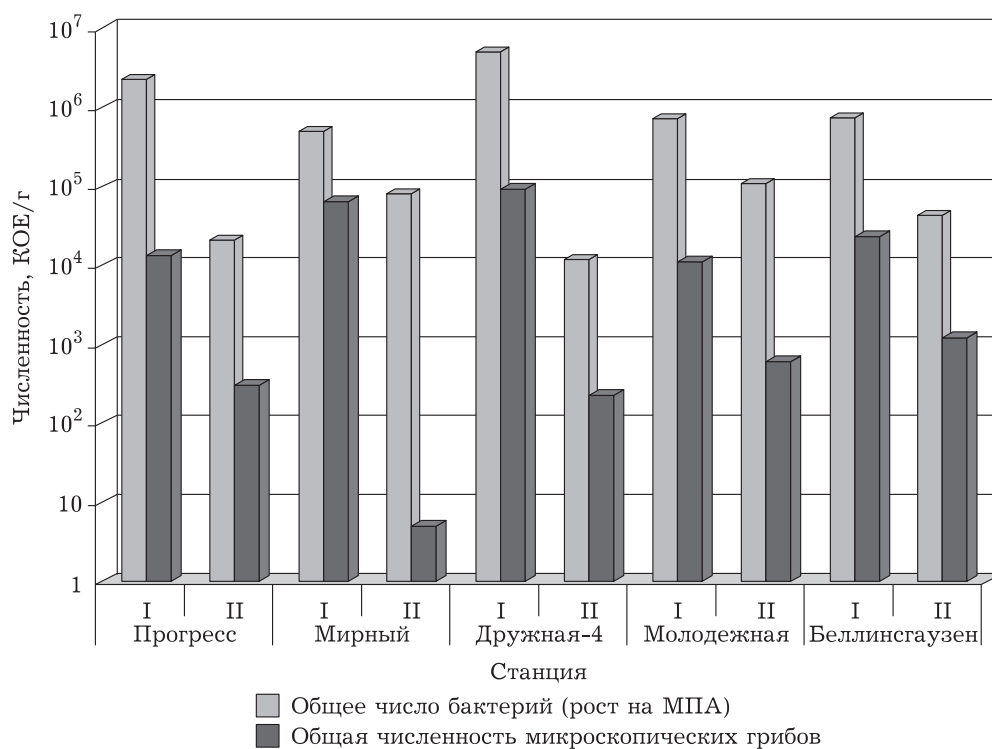


Рис. 2. Численность микроорганизмов (бактерий и микроскопических грибов) в антропогенно загрязненных (I) и контрольных (II) почвах и грунтах в районах антарктических станций. По оси ординат – численность микроскопических грибов и бактерий (колониеобразующие единицы – КОЕ на 1 г почвы)

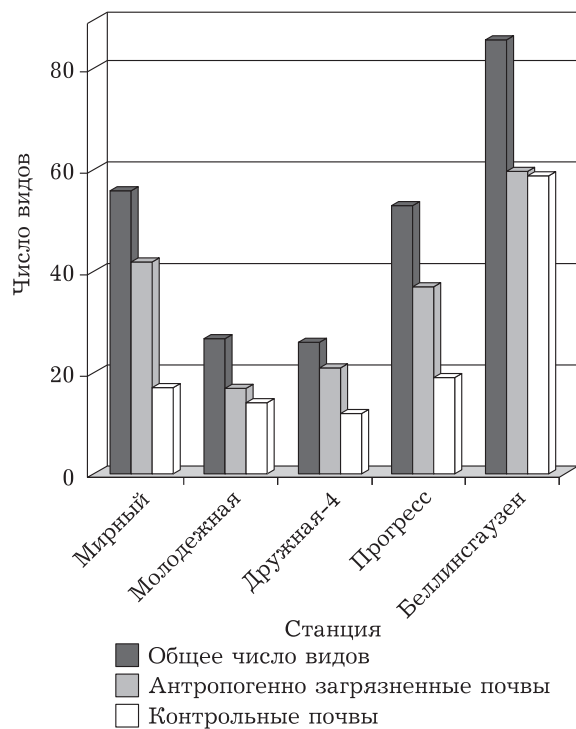


Рис. 3. Число видов микроскопических грибов, выделенных из контрольных и антропогенно загрязненных почв в районах антарктических станций

микробиоты Восточной Антарктиды входят 77 видов. Из них в контрольных почвах выявлено 28 видов, в антропогенно загрязненных – 53 вида, а на привнесенных материалах – 57 видов. Показатели разнообразия по станциям заметно варьируют (от 27 видов в районе ст. Молодежная, до 56 в районе ст. Мирный).

В Субантарктике (район ст. Беллинсгаузен) идентифицировано 87 видов микроскопических грибов, из них в контрольных почвах – 59 видов, в антропогенно загрязненных – 60 видов, на привнесенных материалах – 28 видов.

В районе каждой станции число видов в антропогенно загрязненных почвах увеличивается по сравнению с контрольными почвами (рис. 3). Общее число микробиоты, не отмеченных в контрольных почвах, составляло 39 видов. Вероятно, большинство из них являются инвазивными, т. е. их появление в антарктических экосистемах связано с человеком. К этой группе отнесены виды, приуроченные к антропогенным материалам и не

встречающиеся в контрольных почвах. В то же время микробиоты, обнаруженные только в контрольных почвах, рассматриваются как аборигенные.

Выявленные 104 вида микробиоты относятся к 45 родам. Отдел Zygomycota содержит семь видов, отдел Basidiomycota – два вида, отдел Ascomycota представлен наиболее широко и насчитывает 95 видов. Стоит отметить, что сумчатую стадию в условиях культуры формировали только виды родов *Chaetomium* и *Thelebolus*. Остальные виды, как правило, имели только конидиальное спороношение. В группы доминирующих видов (табл. 3) вошли микробиоты, которые характеризовались наиболее высокими показателями встречаемости в изученных местообитаниях. Так, для почв Восточной Антарктиды к ним можно отнести *Pseudogymnoascus pannorum* (Link) Minnis & D. L. Lindner, *Phoma herbarum* Westend., *Thelebolus microsporus* (Berk. & Broome) Kimbr., *Cadophora malorum* (Kidd & Beaumont) W. Gams, *Aureobasidium pullulans* (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud., которые преобладали как в контрольных, так и в загрязненных почвах (см. рис. 5).

Как видно из графика и расчета максимального среднего значения индекса $Chao_1$, рассчитанного для кривой накопления видов в Восточной Антарктиде (рис. 4, а), выявлены практически все ожидаемые виды, обитающие на антропогенных субстратах ($Chao_1 = 53,0 \pm 20,4$, отмечено 53 вида), а также в контрольных почвах ($Chao_1 = 29,75 \pm 1,25$, 29 видов). В меньшей степени определен видовой состав грибов в загрязненных почвах ($Chao_1 = 58,20 \pm 1,25$, 54 вида). Видовое богатство и разнообразие микробиоты уменьшается от антропогенных субстратов (53 вида, $H' = 3,5$; $D = 25,0$) и антропогенно загрязненных почв (54 вида, $H' = 3,2$; $D = 18,1$) к контрольным почвам (29 видов, $H' = 2,5$; $D = 8,41$).

При анализе графика и расчетов максимального среднего значения индекса $Chao_1$, рассчитанного для кривой накопления видов в Субантарктике (см. рис. 4, б), также выявлены практически все ожидаемые виды, обитающие на антропогенных субстратах ($Chao_1 = 28,00 \pm 1,12$; 28 видов) и в антропогенно загрязненных почвах ($Chao_1 = 60,46 \pm 0,87$;

Доминирующие виды микромицетов, встречающиеся в районах антарктических полярных станций России

Контрольные почвы и грунты	Антропогенно загрязненные почвы и грунты	Привнесенные материалы
Восточная Антарктида (район станций Мирный, Прогресс, Молодежная, Дружная-4)		
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud	<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl	<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl
<i>Cadophora malorum</i> (Kidd & Beaumont) W. Gams	<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud	<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnfud
<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D. L. Lindner	<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G. A. de Vries	<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G. A. de Vries
<i>Penicillium glabrum</i> (Wehmer) Westling	<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D. L. Lindner	<i>Penicillium aurantiogriseum</i> Dierckx
<i>Phoma herbarum</i> Westend	<i>Penicillium aurantiogriseum</i> Dierckx	<i>P. canescens</i> Sopp
<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr	<i>P. glabrum</i> (Wehmer) Westling	<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.
<i>Rhodotorula</i> sp.	<i>Phoma herbarum</i> Westend	<i>Ulocladium consortiale</i> (Thüm.) E. G. Simmon
<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.	<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.	
	<i>Ulocladium consortiale</i> (Thüm.) E. G. Simmons	
Субантарктика (район станции Беллинсгаузен)		
<i>Antarctomyces psychrotrophicus</i> Stchigel & Guarro	<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl	<i>Chaetomium globosum</i> Kunze
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud	<i>Cladosporium ladosporioides</i> (Fresen.) G. A. de Vries	<i>Coniosporium</i> sp.
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G. A. de Vries	<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D. L. Lindner	<i>Phoma herbarum</i> Westend
<i>Pseudogymnoascus pannorum</i> (Link) Minnis & D. L. Lindner	<i>Phoma</i> sp.	<i>Ph.</i> sp.
<i>Mortierella elongata</i> Linnem.	<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr	<i>Penicillium expansum</i> Link
<i>M. parvispora</i> Linnem.	<i>Ulocladium consortiale</i> (Thüm.) E. G. Simmons	<i>P. simplicissimum</i> (Oudem.) Thom
<i>Penicillium glabrum</i> (Wehmer) Westling	<i>Trichoderma viride</i> Pers	<i>Ulocladium consortiale</i> (Thüm.) E. G. Simmons
<i>P. lanosum</i> Westling		
<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.		

60 видов). В то же время в контрольных почвах этот показатель оказался несколько ниже ($Chao1 = 60,74 \pm 1,92$; 59 видов). Показатели видового разнообразия микромицетов в антропогенно загрязненных (60 видов, $H' = 3,86$; $D = 38,89$) и контрольных почвах (59 видов, $H' = 3,73$; $D = 31$) оказались практически на одном уровне, но снижались для антропогенных субстратов (28 видов, $H' = 3,23$; $D = 22,5$).

Сравнительный анализ распределения комплексов микромицетов с использованием

метода неметрического многомерного шкалирования (NMDS) позволил установить, что микобиота в районе ст. Беллинсгаузен (Субантарктика) образует отдельный кластер (кластер А на рис. 6), обособленный от комплексов микроскопических грибов Восточной Антарктиды. Эллипсы дисперсии для ст. Дружная-4 (группа F) и Молодежная (группа D) (сезонные станции) значительно перекрываются и образуют второй кластер, тогда как ст. Мирный (группа С) и Прогресс (группа В) перекрываются частично и образуют третий кла-

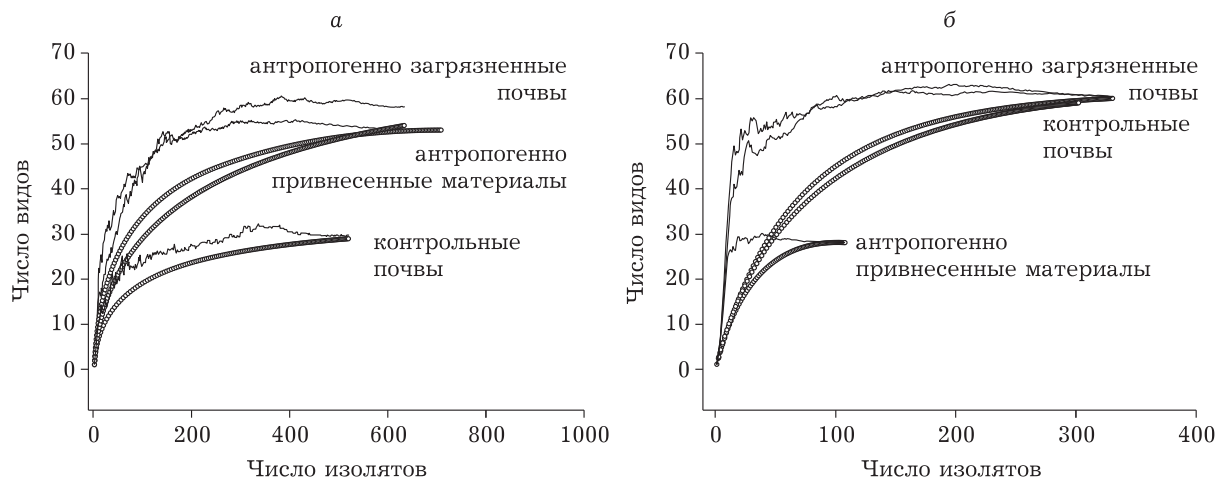


Рис. 4. Результаты бутстреп-анализа для оценки числа полного выявления видов в районе исследования в зависимости от числа изолятов. Тонкие линии – средние значения индекса Chaol (ожидаемое число видов) по мере увеличения числа изолятов, сплошные линии – сглаженные кривые разрежения в зависимости от числа выявленных изолятов; а – общие средние для станций восточной Антарктиды, б – Субантарктика (ст. Беллинсгаузен)

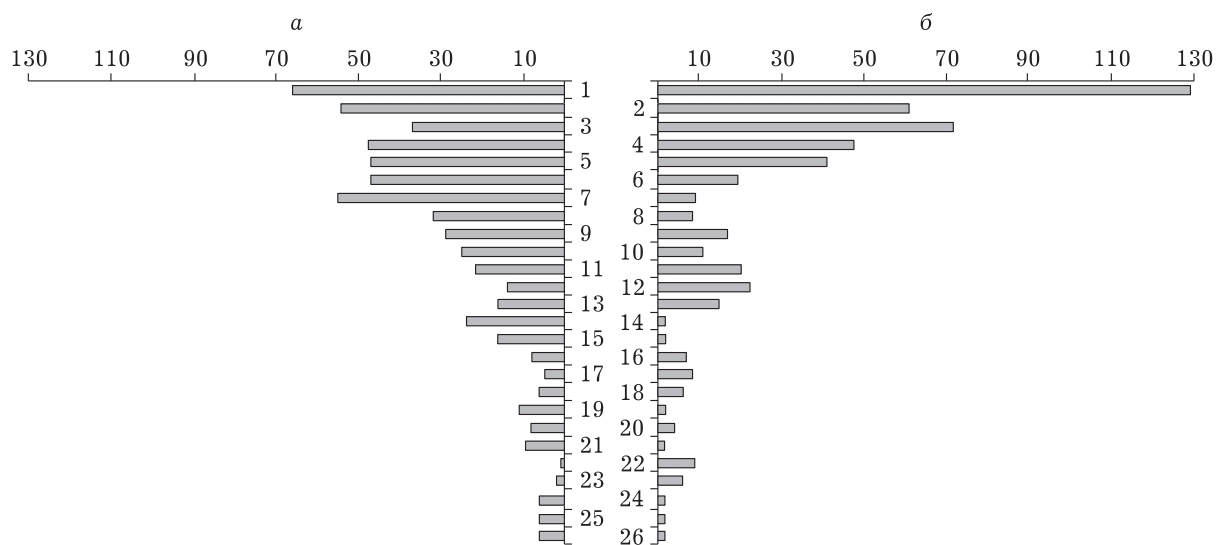


Рис. 5. График рангового распределения видов микроскопических грибов в антропогенно загрязненных (а) и контрольных (б) почвах и грунтах для районов Восточной Антарктиды (по горизонтали число выделенных изолятов; по вертикали ранжированы микроскопические грибы по мере увеличения числа их изолятов: 1 – *Pseudogymnoascus pannorum* (Link) Minnis & D. L. Lindner; 2 – *Phoma herbarum* Westend.; 3 – *Thelebolus microsporus* (Berk. & Broome) Kimbr.; 4 – *Cadophora malorum* (Kidd & Beaumont) W. Gams; 5 – *Aureobasidium pullulans* (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud; 6 – *Cladosporium cladosporioides* (Fresen.) G. A. de Vries; 7 – *Ulocladium consortiale* (Thüm.) E. G. Simmons; 8 – *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl; 9 – *Penicillium glabrum* (Wehmer) Westling; 10 – *P. expansum* Link; 11 – *P. lanosum* Westling; 12 – *Rhodotorula* sp.; 13 – *Phoma* sp.; 14 – *Penicillium aurantiogriseum* Dierckx; 15 – *P. canescens* Sopp; 16 – *Mortierella elongata* Linnem.; 17 – *Isaria farinosa* (Holmsk.) Fr. 18 – *Antarctomyces psychrotrophicus* Stchigel & Guarro; 19 – *Penicillium corylophilum* Dierckx; 20 – *P. waksmanii* K. M. Zaleski; 21 – *Trichoderma viride* Pers.; 22 – *Geomyces vinaceus* Dal Vesco; 23 – *Cephalotrichum microsporum* (Sacc.) P. M. Kirk; 24 – *Trichoderma harzianum* Rifai; 25 – *Trichurus spiralis* Hasselbr.; 26 – *Wardomyces inflatus* (Marchal) Henneber

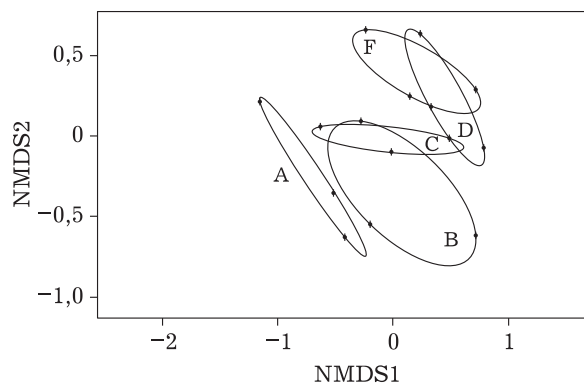


Рис. 6. Результат неметрического многомерного шкалирования (NMDS) пяти станций на основе анализа встречаемости видов в их районах. Черные точки – ординация комплексов микроскопических грибов; эллипсы – дисперсия на основе стандартного отклонения баллов; А – Беллингаузен; В – Прогресс; С – Мирный; D – Молодежная; F – Дружная-4

стер. Стоит отметить, что две последние станции в настоящее время являются крупнейшими, работают в течение всего года, а их территории наиболее подвержены антропогенному влиянию.

ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что для почв и грунтов Антарктики характерно бедное видовое разнообразие и низкая численность микроорганизмов. Однако антропогенное загрязнение антарктических экосистем, которое происходит в результате хозяйственной деятельности на территориях полярных станций, способно существенно изменить показатели биоразнообразия почвенной микробиоты. Особенно заметно это проявляется в Восточной Антарктиде. Комплексы микромицетов контрольных почв (не подвергавшихся антропогенному воздействию и находящихся на значительном удалении от полярных станций) здесь изначально крайне бедны, что можно объяснить отсутствием растительности и жесткими климатическими условиями. Анализ обилия основных групп микроскопических грибов в этих почвах показал, что наиболее высокой в них оказалась доля микромицетов из родов *Aureobasidium*, *Cadophora*, *Pseudogymnoascus* (*Geomyces*), *Thele-*

bolus, *Phoma*. Активная хозяйственная деятельность в районах таких крупных станций, как Прогресс и Мирный, существенно изменила ситуацию. Разнообразие почвенных грибов в зонах антропогенного влияния в Восточной Антарктиде оказалось почти в 2 раза выше в сравнении с контрольными почвами.

При этом наибольшая численность микроорганизмов зафиксирована в антропогенно загрязненных почвах полярной ст. Дружная-4, на территории которой присутствуют техногенные и бытовые загрязнения.

Видовое разнообразие почвенных микромицетов в Субантарктике на контрольных (“чистых”) территориях оказалась значительно богаче, чем в Восточной Антарктиде, что может обуславливаться более мягкими климатическими условиями, высокой влажностью, а также наличием развитого растительного покрова, представленного преимущественно мохово-лишайниковыми сообществами. Здесь заметно увеличилась доля микромицетов из родов *Cladosporium* и *Antarctomices*, которые хотя и отмечались в контрольных почвах Восточной Антарктиды, но не входили там в число доминантных видов. В районе расположения ст. Беллингаузен разнообразие микромицетов нарушенных и природных экосистем оказалось примерно сходным по количеству выявленных видов.

Несмотря на различия в составе микобиоты разных частей Антарктики, общая тенденция возрастания видового разнообразия грибов в районах полярных станций сохраняется для всех обследованных территорий. Очевидно, что под влиянием человека происходит изменение и обогащение видового состава микромицетов за счет появления новых видов, которые не отмечались в контрольных почвах. Так, виды рода *Alternaria* (*A. alternata* (Fr.) Keissl, *A. oudemansii* (E. G. Simmons) Woudenb. & Crous, *A. tenuissima* (Kunze) Wiltshire, *A. terricola* Woudenb. & Crous), а также виды рода *Aspergillus* (девять видов) отмечены в антропогенно загрязненных почвах и на привнесённых материалах. Эти виды рассматриваются как инвазивные, но способные закрепиться в полярных экосистемах за счет высокого адаптационного потенциала и нали-

чия во внешней среде источников питания (прежде всего, привнесенных человеком материалов). Полученные данные существенно дополняют материалы предшествующих исследований [Власов и др., 2012].

Всего в результате проведенных исследований идентифицировано 104 вида микроскопических грибов, большая часть из которых является обычными видами для антропогенных местообитаний. Наибольшим числом видов представлен род *Penicillium* (26 видов), причем только пять видов этого рода отмечено в контрольных почвах Восточной Антарктиды (как правило, единичные находки), из которых только *Penicillium glabrum* (Wehmer) Westling и *P. lanosum* Westling присутствуют в нескольких образцах. В то же время в контрольных почвах Субантарктики отмечено 15 видов рода *Penicillium*, хотя число изолятов этих видов оказалось крайне незначительным. В контрольных почвах практически не выделялись (или выделялись только отдельными колониями) виды родов *Chaetomium*, *Mucor*, *Ulocladium*, однако их численность резко увеличивалась в антропогенно загрязненных почвах.

Таким образом, состав сообществ микромицетов в районах полярных станций в различных частях Антарктики заметно различается. Однако общая тенденция возрастания видового разнообразия и численности микромицетов в зонах антропогенного влияния в сравнении с контрольными территориями сохраняется для всех изученных местообитаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом полученные данные свидетельствуют о значительном изменении численности и видового состава микроскопических грибов в антарктических экосистемах под влиянием человека. В загрязненных почвах наблюдается многократное увеличение их численности и разнообразия в сравнении с контрольными (чистыми) территориями. Отмечено высокое сходство видового состава загрязненных почв и антропогенных субстратов, что свидетельствует об инвазивном происхождении ряда видов и их возможном переходе к

существованию в почвах и грунтах Антарктиды.

Количественные характеристики комплексов микромицетов могут использоваться при оценке антропогенного воздействия на полярные экосистемы.

Работа частично выполнялась в рамках госзадания согласно тематическому плану БИН РАН по теме № 01201255604, гранту РФФИ 16-04-01649 и программе фундаментальных исследований Президиума РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Абакумов Е. В., Лодыгин Е. Д., Габова 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.
- 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 // Микол. и фитопатол. 2012. Т. 46, № 1. С. 20–26.
- Водяницкий Ю. Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М., 2008. 164 с.
- Звягинцев Д. В. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Моск. гос. ун-т, 1991. 303 с.
- Кирцидели И. Ю. Почвенные микромицеты арктических тундр Таймырского побережья Карского моря // Микол. и фитопатол. 1999. Т. 33, № 1. С. 19–24.
- Кирцидели И. Ю., Власов Д. Ю., Абакумов Е. В., Гиличинский Д. А. Разнообразие и ферментативная активность микромицетов из почв Антарктики // Там же. 2010. Т. 44, № 5. С. 387–397.
- 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) // Там же. 2014. Т. 48, № 6. С. 365–371.
- Кирцидели И. Ю., Тешебаев Ш. Б., Власов Д. Ю., Новожилков Ю. К., Абакумов Е. В., Баранцевич Е. П., Крыленков В. А., Зеленская М. С. Изменение микробных сообществ в первичных почвах и грунтах в районе Антарктической станции “Мирный” при антропогенном влиянии // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 10. С. 949–955.
- Шитиков В. К., Зинченко Т. Д., Розенберг Г. С. Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели. Тольятти, 2011. 255 с.
- Abakumov E., Mukhametova N. Microbial biomass and basal respiration of selected Sub-Antarctic and An-

- tartic soils in the areas of some Russian polar stations // *Solid Earth*. 2014. Vol. 5, N 2. P. 705–712.
- Aislabie J., Saul D. J., Foght J. M. Bioremediation of hydrocarboncontaminated polar soils // *Extremophiles*. 2006. Vol. 10. P. 171–179.
- Aislabie J. M., Balks M. R., Foght J. M., Waterhouse E. J. Hydrocarbon spills on Antarctic soils: Effects and management // *Environ. Sci. Technol.* 2004. Vol. 38. P. 1265–1274.
- Aislabie J. M., Jordan S., Barker G. M. Relation between soil classification and bacterial diversity in soils of the Ross Sea region, Antarctica // *Geoderma*. 2008. Vol. 144. P. 9–20.
- Amaro E., Padeiro A., de Ferro A. M., Mota A. M., Leppe M., Verkulich S., Hughes K. A., Peter H., Canário J. Assessing trace element contamination in Fildes Peninsula (King George Island) and Ardley Island, Antarctic // *Marine Pollution Bull.* 2015. Vol. 97, N 1-2. P. 523–527.
- Arenz B. E., Held B. W., Jurgens J. A., Blanchette R. A. Fungal colonization of exotic substrates in Antarctica // *Fungal Diversity*. 2011. Vol. 49, N 1. P. 13–22.
- 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 Biol. Biochem.* 2006. Vol. 38. P. 3057–3064.
- Bargagli R. Environmental contamination in Antarctic ecosystems // *Sci. Total Environ.* 2008. Vol. 400, N 1-3. P. 212–226.
- Beznosikov V. A., Lodygin E. D. Ecological-geochemical assessment of hydrocarbons in soils of Northeastern European Russia // *Eurasian Soil Sci.* 2010. Vol. 43, N 5. P. 550–555.
- Cáceres M. D., Legendre P. Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference // *Ecology*. 2009. Vol. 90, N 12. P. 3566–3574.
- Claridge G. G. C., Campbell I. B., Powell H. K. J., Amin Z. H., Balks M. R. Heavy metal contamination in some soils of the McMurdo Sound region, Antarctica // *Antarctic Sci.* 1995. Vol. 7, N 1. P. 9–14.
- 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 Ecol.* 2012. Vol. 5, N 1. P. 3–21.
- Colwell R. K., EstimateS 9.10. User's Guide. 2014. URL: <http://viceroy.eeb.uconn.edu/EstimateS>.
- Coulon F., Pelletier E., St Louis R., Gourhant L., Delille D. Degradation of petroleum hydrocarbons in two sub-antarctic soils: Influence of an oleophilic fertilizer // *Environ. Toxicol. Chem.* 2004. Vol. 23. P. 1893–1901.
- Duncan S. M., Farrell R. L., Jordan N., Jurgens J. A., Blanchette R. A. Monitoring and identification of airborne fungi at historic locations on Ross Island, Antarctic // *Polar Sci.* 2010. Vol. 4, N 2. P. 275–283.
- Hsiao C. R., Huang L., Bouchara J. P., Barton R., Li H. C., Chang T. C. Identification of medically important molds by an oligonucleotide array // *J. Clin. Microbiol.* 2005. Vol. 43, N 8. P. 3760–3768.
- Jesus H., Peixoto R., Rosado A. Bioremediation in Antarctic Soils // *J. Pet. Environ. Biotechnol.* 2015. Vol. 6. P. 248–260.
- Kurtzman C. P., Robnett C. J. Identification and phylogeny of ascomycetous yeasts from analysis of nuclear large subunit (26S) ribosomal DNA partial sequences // *Antonie Van Leeuwenhoek*. 1998. Vol. 73, N 4. P. 331–371.
- Li H. C., Bouchara J. P., Hsu M. M., Barton R., Chang T. C. Identification of dermatophytes by an oligonucleotide array // *J. Clin. Microbiol.* 2007. Vol. 45, N 10. P. 3160–3166.
- Magurran A. E. *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Science Ltd., 2004. 264 p.
- Martins C. C., Bicego M. C., Rose N. L., Taniguchi S., Lourenço R. A., Figueira R. C. Historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and spheroid carbonaceous particles (SCPs) in marine sediment cores from Admiralty Bay, King George Island, Antarctica // *Environ. Pollut.* 2010. Vol. 158, N 1. P. 192–200.
- Osyczka P., Mleczko P., Karasinski D., Chlebicki A. Timber transported to Antarctica: A potential and undesirable carrier for alien fungi and insects // *Biol. Invasions*. 2012. Vol. 14. P. 15–20.
- Santos I. R., Silva-Filho E. V., Schaefer C. E. G. R., Albuquerque-Filho M. R., Campos L. S. Heavy metal contamination in coastal sediments and soils near the Brazilian Antarctic Station, King George Island // *Marine Pollution Bull.* 2005. Vol. 50, N 2. P. 185–194.
- Stephenson S. L., Kalyanasundaram I., Lakhanpal T. N. A comparative biogeographical study of myxomycetes in the mid-Appalachians of eastern North America and two regions of India // *J. Biogeogr.* 1993. Vol. 20. P. 645–657.
- Waterhouse E. J. *Ross Sea region 2001: A state of the Environment Report for the Ross Sea Region of Antarctica*. Christchurch: New Zealand Antarctic Institute (Antarctica New Zealand), 2001. 165 p.

Yergeau E., Arbour M., Brousseau R., Juck D., Lawrence J. R. Microarray and real-time PCR analyses of the responses of high-arctic soil bacteria to hydro-

carbon pollution and bioremediation treatments // Appl. Environ. Microbiol. 2009. Vol. 75. P. 6258–6267.

Assessment of Anthropogenic Influence on Antarctic Mycobiota in Areas of Russian Polar Stations

I. Yu. KIRTSIDELI¹, D. Yu. VLASOV^{1,2}, Yu. K. NOVOZHILOV¹, E. V. ABAKUMOV², E. P. BARANTSEVICH^{3,1}

¹ Botanical Institute of Russian Academy of Sciences
197376, St. Petersburg, prof. Popov str., 2
E-mail: microfungi@mail.ru

² Saint-Petersburg State University
199034, St. Petersburg, University emb., 7/9

³ Northwestern Almazov Federal medical research center of the Russian Federation Ministry of Health
197341, St. Petersburg, Akuratov str., 2

The results of the investigation of microscopic fungi complexes in the regions of five Russian polar stations in East Antarctica and the Subantarctic are presented in the article. A total of 104 species of microscopic fungi were identified. In samples of soils and anthropogenic materials from polar stations of East Antarctica (Progress, Mirny, Molodezhnaya, Druzhnaya-4) 77 species of fungi were detected by mycological methods, while 87 species of micromycetes were isolated from the Bellingshausen station (Subantarctic). The number of fungi in soils varied from individual propagules in control soils to 94,000 per gram of soil in contaminated areas. The largest number of species is represented by the genus *Penicillium* (26 species). The species of fungi that form the core of mycobiota in most of the studied habitats have been identified. For soils of East Antarctica it is formed by species of the genera *Aureobasidium*, *Cadophora*, *Pseudogymnoascus* (*Geomyces*), *Thelebolus*, and *Phoma*. There are significant differences in the mycobiota of East Antarctica and the Subantarctic. At the same time, the general tendency of the increase in the species diversity and the number of fungi in the areas of polar stations in comparison with the control (clean) sites for all studied territories was noted. The obtained data indicate that a significant part of micromycetes enters into Antarctic together with the man (anthropogenic invasion).

Key words: microfungi, Antarctic, anthropogenic influence, anthropogenic substrates, microbial communities, mycobiota, soil.