

16. Дементьев М.С. Гидробиологические последствия и методика определения пылевого загрязнения нивально-гляциальных систем. *Криосфера Земли*. 2016; 20(1): 26–9.
17. Водяницкий Ю.Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах. *Почвоведение*. 2012; (3): 368–75.
18. Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах. Available at: http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_13248.htm
19. ПДК воздуха населенных пунктов. Available at: <http://ecmoptec.ru/pdknasmest>

References

1. Materials to the state report «On the state sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation for the Stavropol Territory in 2015». Stavropol'; 2015. (in Russian)
2. The overall incidence of child population of the Russian Federation (0–14). Statistical data. Available at: <https://www.rosminzdrav.ru> (in Russian)
3. Davydova S.L., Tagasov V.I. *Heavy Metals Like Supertoxicants the XXI Century [Tuzhelye metally kak supertoksikanty XXI veka]*. Moscow; 2002. (in Russian)
4. Alekin O.A., Semenov A.D., Skopintsev B.A. *Guidelines for Chemical Analysis of Surface Waters [Rukovodstvo po khimicheskomu analizu vod sushij]*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973. (in Russian)
5. Shpeizer G.M., Mineeva L.A. *Guidelines for Chemical Analysis of Water: Manual [Rukovodstvo po khimicheskomu analizu vody: metodicheskoe posobie]*. Irkutsk; 2006. (in Russian)
6. Reutova T.V., Reutova N.V., Tsepikova N.L. Comparative characteristics posttechnogenic and background landscapes in the Northern Depression of the Central Caucasus. In: *Proceedings of the International Conference «Sustainable Development of Mountain Areas: Problems and Prospects of Integration of Science and Education» [Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Ustoychivoe razvitiye gornyykh territoriy: problemy i perspektivy integratsii nauki i obrazovaniya»]*. Vladikavkaz; 2004: 262–4. (in Russian)
7. State report «On the state and Environmental Protection of the Karachay-Cherkess Republic in 2004. Administration for technological and ecological control for the Karachayevo-Cherkessia Republic». Cherkessk; 2005. (in Russian)
8. Butaev A.M., Guruev M.A., Magomedbekov U.G., Osipova N.F., Magomedrasulova Kh.V., Magomedova A.D., et al. Heavy metals in the river waters of Dagestan. *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra*. 2006; (26): 43–50. (in Russian)
9. Vdovina O.K. Evaluation of eco-geochemical natural hazard mountainous areas while developing them as a recreational. *Vestnik RUDN. Seriya Inzhenernye issledovaniya*. 2009; (3): 79–82. (in Russian)
10. Vorob'eva T.I., Gushchina L.P., Zhinzhakova L.Z., Reutova T.V., Cherednik E.A., Mashukov Kh.Kh. Formation of trace-element composition of river waters in the Central Caucasus. In: *Materials of the Scientific-Practical Conference «Modern Fundamental Problems of Hydrochemistry and Surface Water Quality Monitoring in Russia»*. Rostov-na-Donu; 2009: 39–42. (in Russian)
11. Shtefko Yu.Yu., Dement'ev M.S. Ecological features of formation of quality of surface water irrigation path Kuban-Manych. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2009; 11(1): 1194. (in Russian)
12. Toroyan R.A. Heavy metals in the aquatic ecosystem of the river Belaya Northwest Caucasus. In: *Proceedings of the Conference Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geo-ecology, Using Modern Information Technologies [Sbornik konferentsii prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii]*. Maykop; 2013: 229–36. (in Russian)
13. Report on the state of the environment and nature in the Stavropol Territory in 2014. Stavropol; 2015. (in Russian)
14. Dement'eva D.M., Dement'ev M.S. Background transboundary environmental water crisis tract Kuban-Manych. *Gigiena i sanitariya*. 2016; 95(9): 837–41. (in Russian)
15. Scheme of complex use and protection of water bodies of the Kuban River basin Available at: <http://www.kbv-u-fgu.ru/docs7> (in Russian)
16. Dement'ev M.S. Hydrobiological implications and method of determining the dust pollution nival-glacial systems *Kriosfera Zemli*. 2016; 20(1): 26–9. (in Russian)
17. Vodyanitskiy Yu.N. The standards for the content of heavy metals and metalloids in soils. *Pochvovedenie*. 2012; (3): 368–75. (in Russian)
18. Maximum permissible concentrations of heavy metals and arsenic in food raw materials and food products. Available at: http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_13248.htm (in Russian)
19. Maximum permissible concentration of air in populated areas. Available at: <http://ecmoptec.ru/pdknasmest> (in Russian)

Поступила 13.06.17

Принята к печати 05.07.17

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2017

УДК 614.771:631.46(99)

Кирицели И.Ю.¹, Тешебаев Ш.Б.³, Власов Д.Ю.^{1,2}, Новожилов Ю.К.¹, Абакумов Е.В.², Баранцевич Е.П.⁴, Крыленков В.А.², Зеленская М.С.²

ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ В ПЕРВИЧНЫХ ПОЧВАХ И ГРУНТАХ В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «МИРНЫЙ» ПРИ АНТРОПОГЕННОМ ВЛИЯНИИ

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

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

³ ФГБУ «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт», 199397, Санкт-Петербург;

⁴ ФГБУ «Северо-Западный федеральный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 197341, Санкт-Петербург

Антарктическая станция «Мирный» – первая российская (советская) антарктическая станция, и антропогенное влияние на «первичные» почвы и каменные грунты в этом районе оказывается на протяжении более 60 лет. Это отражается как на химическом составе почв, так и на сообществах микроорганизмов. В статье показано многократное (резкое) увеличение численности бактерий и микроскопических грибов в антропогенно загрязненных почвах. Загрязнение почвы изменяет структуру сообществ микроорганизмов. Увеличивается доля изолятов мезофильных бактерий (90%). Увеличивается доля спор и уменьшается доля мицелия микроскопических грибов. Статистический анализ показал, что авторами этой статьи были выявлены практически все ожидаемые виды, обитающие на антропогенных субстратах (42 вида), а также в контрольных почвах (17 видов). В меньшей степени был выявлен видовой состав грибов в загрязненных почвах (32 вида). Доказано, что увеличение числа видов грибов в районе полярной станции происходило под влиянием человека, прежде всего, за счёт интродукции новых видов. Установлено, что аборигенные виды микроскопических грибов осваивали новые материалы, ранее недоступные им, и переходили к активной биодеградации антропогенных материалов. Среди микромицетов, выявленных в антропогенно загрязнённых почвах и на антропогенных субстратах, более 80% могут быть отнесены к условным патогенам. Таким образом, индикатором изменений комплексов микроорганизмов в грунтах и первичных почвах может быть общее число микроорганизмов (КОЕ), структура микробных комплексов, видовой состав сообществ, индикаторные виды, структура биомассы.

Ключевые слова: Антарктида; антропогенное влияние; антропогенные субстраты; микобиота; микробные сообщества; почва.

Для цитирования: Кирицели И.Ю., Тешебаев Ш.Б., Власов Д.Ю., Новожилов 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; 96(10): 949–955. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-10-949-955>

Для корреспонденции: Кирицели Ирина Юрьевна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. отдела микологии Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН, 197376, Санкт-Петербург. E-mail: microfungi@mail.ru

Kirtsideli I.Yu.¹, Teshebaev Sh.B.³, Vlasov D.Yu.^{1,2}, Novozhilov Yu.K.¹, Abakumov E.V.², Barantsevich E.P.⁴, Krylenkov V.A.², Zelenskaya M.S.²

CHANGES IN MICROBIAL COMMUNITIES IN PRIMARY SOIL AND GROUND UNDER THE ANTHROPOGENIC INFLUENCE ON THE TERRITORY AROUND ANTARCTIC STATION "MIRNY"

¹Komarov Botanical Institute of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 197376, Russian Federation;

²Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russian Federation;

³Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, 199397, Russian Federation;

⁴Almazov Northwestern Federal Medical Research Center, St. Petersburg, 197341, Russian Federation

Antarctic station "Mirny" was the first Russian (Soviet) polar station in Antarctica. The anthropogenic impact on the primary ground and soil in the area around of this polar station took place more than 60 years. This is reflected in both the chemical composition of the soil and microbial communities. The article shows multiple increasing of the number of bacteria and microscopic fungi in anthropogenic contaminated soils. Contamination of soil leads to changes of the structure of the microbial community. An increasing proportion of mesophilic bacteria isolates (90%) was shown. The increasing share spores and reduced the proportion of microscopic fungi mycelia were observed. Statistical analysis showed that we have identified almost all of the expected species that live in anthropogenic substrates (42 species), as well as in the control soils (17 species). But we identified only a part of fungal diversity in contaminated soils (32 species). The increase in the number of fungal species in the area of the polar station "Mirny" was proved to be connected with the human activity and introduction of new species. Native species of microscopic fungi were found to be able to colonize new materials previously unavailable to them. They also can be agents of active biodegradation of anthropogenic materials. Among fungal species isolated from anthropogenic contaminated soil and anthropogenic substrates more than 80% can be attributed to opportunistic organisms. Therefore the total number of microorganisms (CFU), the structure of the microbial complexes, the species composition of communities, indicator species, morphology and volume of biomass can be considered as an index of changes in soil microbial complexes and primary soils

Key words: *Antarctic; anthropogenic influence; anthropogenic substrates; microbial communities; mycobiota; soil.*

For citation: Kirtsideli I.Yu., Teshebaev Sh.B., Vlasov D.Yu., Novozhilov Yu.K., Abakumov E.V., Barantsevich E.P., Krylenkov V.A., Zelenskaya M.S. Changes in microbial communities in primary soil and ground under the anthropogenic influence on the territory around Antarctic station "Mirny". *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2017; 96(10): 949-955. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-10-949-955>

For correspondence: *Irina Yu. Kirtsideli*, MD, PhD, DSci., leading researcher of the mycology department of Komarov Botanical Institute of Russian Academy of Science, St. Petersburg, 197376, Russian Federation. E-mail: microfungi@mail.ru

Information about authors:

Kirtsideli I.Yu., <http://orcid.org/0000-0002-4736-2485>; Teshebaev Sh.B., <http://orcid.org/0000-0002-7530-0150>;

Vlasov D.Yu., <http://orcid.org/0000-0002-0455-1462>; Novozhilov Yu.K., <http://orcid.org/0000-0001-8875-2263>;

Abakumov E.V., <http://orcid.org/0000-0002-5248-9018>; Barantsevich E.P., <http://orcid.org/0000-0002-4800-3345>;

Krylenkov V.A., <http://orcid.org/0000-0002-7103-3091>; Zelenskaya M.S., <http://orcid.org/0000-0003-3588-8583>.

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

Acknowledgment: The work was partially carried out in the framework both of state tasks according to the thematic plan of the Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences on the topic No. 01201255604, grants to the RFBR grant 16-04-01649, and the program of fundamental research of the Presidium of the RAS

Received: 14 February 2017

Accepted: 05 July 2017

Введение

Активное освоение человеком высоких широт планеты неизбежно приводит к изменениям полярных экосистем. Влияние хозяйственной деятельности на арктические экосистемы проявляется в загрязнении почв и грунтов углеводородами и продуктами их горения, механическом нарушении поверхности почв, в модификации биоты полярных биогеоценозов. Антропогенная нагрузка на природу отражается и на безопасной жизнедеятельности людей, живущих и работающих в высоких широтах. Одним из показателей происходящих экосистемных изменений может служить микобиота в районах полярных станций и баз. Использование микроорганизмов как объектов биоиндикации может осуществляться на разных уровнях (эколого-ценотическом, организменном, молекулярно-генетическом). Состав и структура микробных сообществ служат отражением экологического состояния ключевых участков полярных ландшафтов [1, 2]. Микроорганизмы, населяющие экстремальные экосистемы высоких широт, в последние годы становятся одними из основных объектов исследований специалистов самых разных специальностей. Во многом это связано с их деструктивными свойствами и влиянием на здоровье людей, находящихся на полярных станциях. Кроме того, таксономический состав микробных сообществ может служить индикатором состояния и изменения экосистем.

Загрязнение атмосферы, разлив топлива, сброс отходов и сточных вод в окружающую среду вызывают заметные изменения экологической и санитарной ситуации в районах полярных станций в Антарктиде [3]. При этом наиболее заметные изменения касаются почв и грунтов, подвергающихся антропогенному загрязнению, что отражается в трансформации состава микобиоты [4, 5]. Исследованию микобиоты Антарктиды посвящён целый ряд работ российских и зарубежных исследователей, в частности, исследованию антропогенно привнесённых материалов [6, 7, 8, 9].

Пути распространения микроорганизмов в антарктических экосистемах ограничены низкой влажностью и температурой воздуха, УФ-излучением и удаленностью территорий, свободных от снега и льда. Эти факторы ограничивают естественное распространение спор микроскопических грибов и КОЕ бактерий с потоками воздуха и проникновение новых видов в высокие широты. Одним из основных переносчиков микроорганизмов в Антарктиде является человек [10, 11, 12, 13], который привносит в полярные экосистемы новые субстраты (искусственные материалы, продукты питания и др.). В результате интродуцированные виды, адаптированные к антропогенным субстратам, могут существенно изменять структуру сложившихся природных микробных сообществ в Антарктиде.

Некоторые свойства почв на станции «Мирный» и содержание приоритетных неорганических токсикантов

Почвы	Органический углерод, %	N, %	C _{тк} /C _{фк}	C _{тк} /C _{общ}	pH	Скелетная фракция гран состава, %	Мелкозем, %	ПАУ (сумма), мг/г	Бенз(а)-пирен	мг/кг, к мелкозёму						
										Хром	Медь	Никель	Свинец	Стронций	Цинк	Мышьяк
Загрязнённые	2,45	0,13	0,27	0,13	6,8	78	22	90,9	2,30	25	12	3	6	11	11	2
Контрольные	0,59	0,04	0,04	0,04	7,2	67	33	40,5	0,82	7	7	2	6	6	8	1

Целью данной работы было исследование состава микробных сообществ (микроскопических грибов и бактерий) в первичных почвах и грунтах в районе российской антарктической станции «Мирный», выявление микроскопических грибов – биодеструкторов материалов, а также условных патогенов человека.

Материал и методы

Станция «Мирный» – первая российская (советская) антарктическая станция, которая находится на побережье моря Дейвиса в Земле Королевы Мэри. Станция была открыта в 1956 г. В ее составе находятся 21 здание и аэродром. Основные постройки возведены в 1971–1978 гг. Антропогенное влияние на первичные почвы и грунты в районе этой станции происходит уже более 60 лет, что отражается на химическом составе почв. Так, содержание полициклических ароматических углеводородов в районе станции Мирный составляет 90,9 мг/г (табл. 1, 2), а в почвах близлежащих островов архипелага Хасуэлл – 22,8 мг/г [14].

Материал для исследования был собран в период 2006–2015 гг. в ходе выполнения научно-исследовательских работ Российской антарктической экспедиции. Почвы, подвергающиеся антропогенному влиянию, были выбраны на территории станции. В качестве контрольных почв были отобраны образцы первичных почв и грунтов, максимально удалённые от территории станции и располагающиеся в местах, которые в других условиях занимают плакорные растительные сообщества. Пробы отбирались с соблюдением стерильности в 10 повторностях на глубине 0–10 см. Выделение микроорганизмов из почв и грунтов проводилось стандартными методами посева на агаризированные питательные среды. Для определения численности бактерий были использованы среды: МПА, Эндо, Эшби, КАА и голодный агар с добавлением нефтепродуктов. Численность грибов подсчитывалась на среде Чапека. Для более полного выделения видового состава микроскопических грибов также использовались метод обрастания частиц почвы на средах Сабуро, овощной агар, минеральный агар с целлюлозой [15].

Антропогенные материалы были представлены полиэтиленовыми материалами, костями, металлическими изделиями, покрытыми краской и целлюлозосодержащими субстратами (бумагой, картоном, ДСП, тканью, древесиной и т. д.), которые попали во внешнюю среду и подверглись экстремальным воздействиям Антарктиды. Частицы этих материалов помещались в стерильные ёмкости, а затем в лаборатории (время транспортировки – нескольких часов) проводилось выделение микроскопических грибов из антропогенных материалов прямым посевом на питательную среду мелких фрагментов данных материалов. Кроме того, использовали смывы с материалов, для чего частицы однородных материалов помещали в колбы со стерильной водой, встряхивали в течение 20 минут и затем 1 мл данной суспензии переносили на питательные среды (среда Чапека, среда Сабуро, овощной агар, минеральный агар с целлюлозой) [15].

Идентификацию микромицетов проводилась с применением стандартных методик и определителей, а также в отдельных случаях были использованы молекулярные методы (как правило, для идентификации дрожжей и стерильного мицелия). Образцы ДНК исследуемых грибов секвенировали по регионам ITS1 и ITS2. Полученные нуклеотидные последовательности сравнивали при помощи программы BLAST с нуклеотидными последовательностями, имеющимися в открытой базе данных на сайте NCBI [16]. Названия и положение таксонов унифицировали с использованием базы данных CBS (www.indexfungorum.org/Names/fungi.asp).

Для оценки ожидаемого числа видов в районах изучения, а также полноты исследования авторами этой статьи использовался подход, разработанный Колуэллом, Готелли и Чао [17] на основе алгоритма генерации выборок. В основе этого подхода лежит конструирование кривой разрежения (rarefaction curve) 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 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» [18]. Для расчёта ожидаемого числа видов в генеральной совокупности, из которой была сделана выборка, был использован скоррек-

Таблица 2

Содержание приоритетных органических токсикантов (в мг/кг) к мелкозёму

Показатель	Почвы	
	Контрольные	Загрязнённые
Нафталин	0,45	1,98
Аценафтен	0,79	2,99
Флуорен	3,23	7,56
Фенантрен	12	29
Антрацен	0,9	2,97
Флуорантрен	15	14,95
Бенз(а)антрецен	1,2	2,84
Пирен	0,7	3,78
Хризен	1,9	5,79
Бенз[b]флуорантен	2,5	3,98
Бенз[k]флуорантен	0,4	3,97
Бенз[a]пирен	0,82	2,3
Дибенз[a,h]антрацен	0,4	1,97
Бенз[ghi]перилен	0,19	2,87
Индено[1,2,3-cd]пирен	0,12	3,95
Сумма ПАУ	40,5	90,9

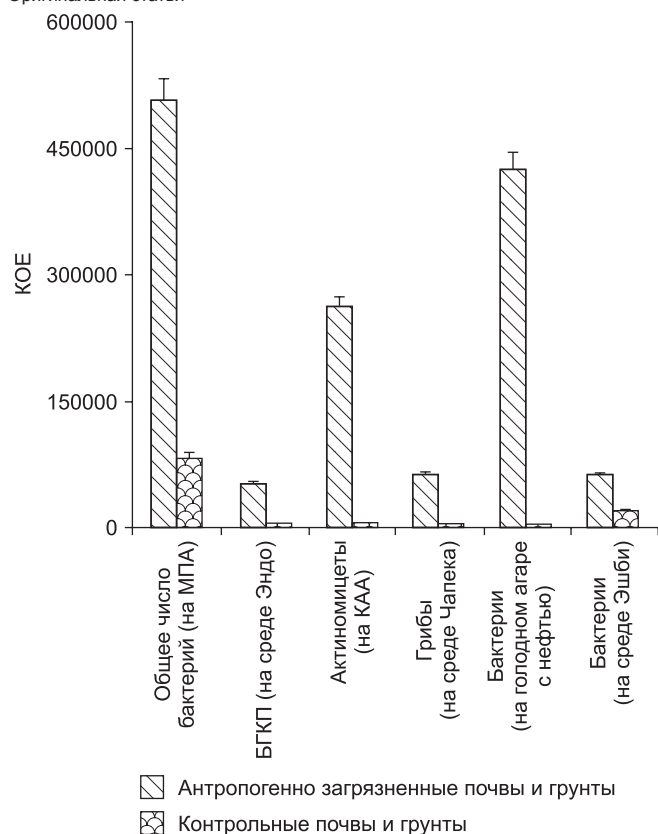


Рис. 1. Численность микроорганизмов в антропогенно загрязненных и контрольных почвах и грунтах.

тированный индекс Chao1 (bias-corrected index). Индекс рассчитывался на основе учёта числа видов, представленных одним изолятом. Для расчёта использовалась некоммерческая программа EstimateS 9.10 [17].

Содержание углерода и азота в почвах определялось на элементном анализаторе EURO EA3028-NT, содержание гуминовых и фульвокислот – по ускоренной пирофосфатной методике [19]. В основу определения ПАУ в почвах положены методики [20, 21], а также работа [22]. Экстракцию проводили при комнатной температуре смесью гексан/ацетон (1:1) с УЗ-обработкой экстракционной системы на УЗ-ванне «Branson 5510» (США), руководствуясь методикой. Фракцию ПАУ очищали при помощи колоночной хроматографии на силикагеле, руководствуясь методикой очистки [23]. Качественное и количественное определение содержания ПАУ в почвах осуществлялось методом обращённо-фазовой ВЭЖХ в градиентном режиме и спектрофлуориметрическом детектировании на хроматографе «Люмахром» фирмы «Люмэкс» (Россия). Хроматографирование выполняли при температуре 30 °C на колонке «Supelcosil™ LC-PAH 5 мкм» (25 см · 2,1 мм). В качестве подвижной фазы использовали градиент ацетонитрил-вода. Пробу объёмом 10 мкл вводили с помощью крана-дозатора. Идентификацию ПАУ проводили по временам удерживания и сравнения спектров флуоресценции, выходящих из колонки компонентов со спектрами стандартных ПАУ. Количественный анализ ПАУ проводился методом внешнего стандарта. Для оценки точности метода был подвержен вышеописанной аналитической процедуре стандарт донных отложений, содержащий ПАУ, Standard Reference Material® 1944 New York/New Jersey Waterway Sediment (Национальный институт Стандартов и Технологий

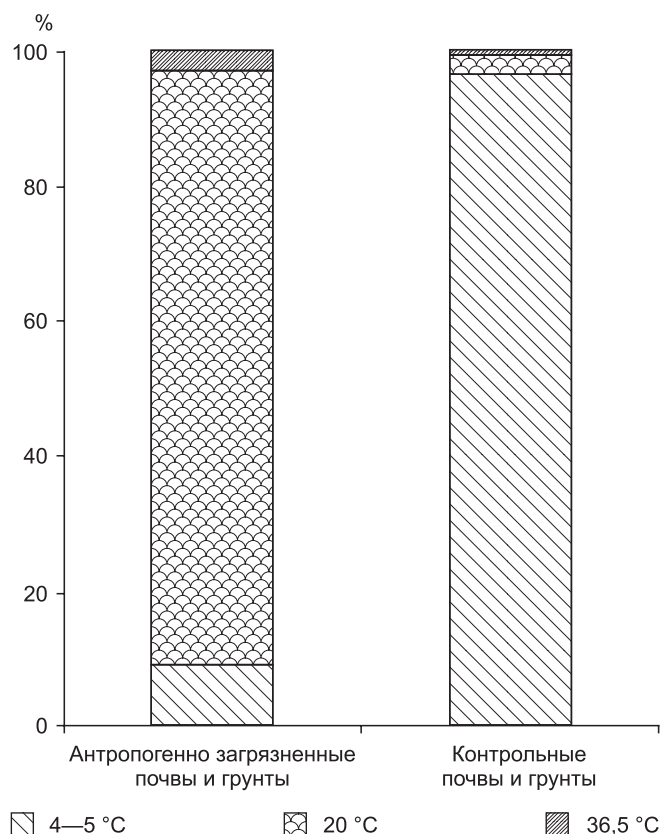


Рис. 2. Доля бактериальных сообществ, формирующихся при различных температурах.

NIST, США), который показал удовлетворительные результаты. Отобранные пробы почв анализировались на содержание валовых форм Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, As и Hg. Определение валового содержания тяжёлых металлов в отобранных пробах производилось рентгенфлуоресцентным методом на спектрометре «СПЕКТРОСКАН МАКС» фирмы «СПЕКТРОН» согласно методике [24].

Результаты

Численность микроорганизмов в почвах и грунтах в районе Антарктической станции «Мирный» колебалась от нескольких сотен до 500 тыс. КОЕ в 1 г почвы для бактерий и от единичных пропагул до 63 тыс. КОЕ на 1 г почвы для грибов (рис. 1). Общее число бактерий (посев на среде МПА) колебалось от 82 тыс. в контрольных почвах до 507 тыс. в антропогенно загрязнённых почвах; численность бактерий группы кишечной палочки (БГКП) составляла 52 тыс. КОЕ на 1 г почвы в антропогенно загрязнённых почвах; численность актиномицетов увеличивалась от единичных пропагул в контрольных почвах до 26,1 тыс. в антропогенно загрязнённых почвах; численность бактерий на среде Эшби возрастала от 20 тыс. в контрольных почвах до 62 тыс. в антропогенно загрязнённых почвах; численность бактерий на голодном агаре с добавлением нефти (т. е. способных к разложению углеводов) возрастала от единичных пропагул в контрольных почвах до 42,6 тыс. в антропогенно загрязнённых почвах.

Приведённые данные показывают многократное увеличение численности всех групп бактерий и микроскопических грибов в антропогенно загрязнённых почвах и грунтах. Особенно сильное воздействие было отмечено для актиномицетов и микроскопических грибов. Повидимому, в крайне бедных первичных почвах и грунтах

увеличение органических веществ (см. табл. 1) способствовало увеличению численности микроорганизмов. Кроме того, в практически «стерильных» условиях Антарктиды антропогенное присутствие является источником распространения микроскопических организмов.

Загрязнение почвы существенно влияет на структуру сообществ микроорганизмов, изменяя долю бактерий, развивающихся при различных температурах инкубации (рис. 2). Доля бактерий, способных к росту при температуре 4–5 °С (психрофилы) составляет 96% для контрольных почв и лишь 9% для антропогенно загрязненных почв. Группа мезофильных бактерий, развивающихся при 20 °С, составляет в загрязненных почвах более 88%. Кроме того, отмечено появление группы термофильных бактерий (2,6%), способных развиваться при температуре более 36,5 °С и, соответственно, представляющих собой группу потенциально патогенных микроорганизмов.

Показано, что даже рекреационная нагрузка и загрязнение органическими веществами первичных почв и грунтов Антарктиды приводит к существенным изменениям структуры сообществ микроорганизмов, в частности, микроскопических грибов. Увеличивается доля спор, уменьшается доля мицелия, изменяется и видовой состав микроскопических грибов. В ходе микологического анализа образцов грунта и первичных почв из района станции «Мирный» идентифицировано 56 видов микроскопических грибов, которые относятся к 26 родам. Отдел *Zygomycota* представлен шестью видами; отдел *Basidiomycota* – двумя видами, отдел *Ascomycota* был представлен наиболее широко и насчитывал 48 видов. Стоит отметить, что сумчатую стадию в условиях культивирования давали только виды родов *Chaetomium* и *Thelebolus*. Остальные виды, как правило, имели только конидиальное спороношение или пикниды.

Как видно из графика (рис. 3) и расчёта максимально-го среднего значения индекса Chao1, рассчитанного для кривой накопления видов, авторами статьи выявлены практически все ожидаемые виды, обитающие на антропогенных субстратах (Chao1 = 42 ± 0,08; 42 вида), а также в контрольных почвах (Chao1 = 17 ± 0,13; 17 видов).

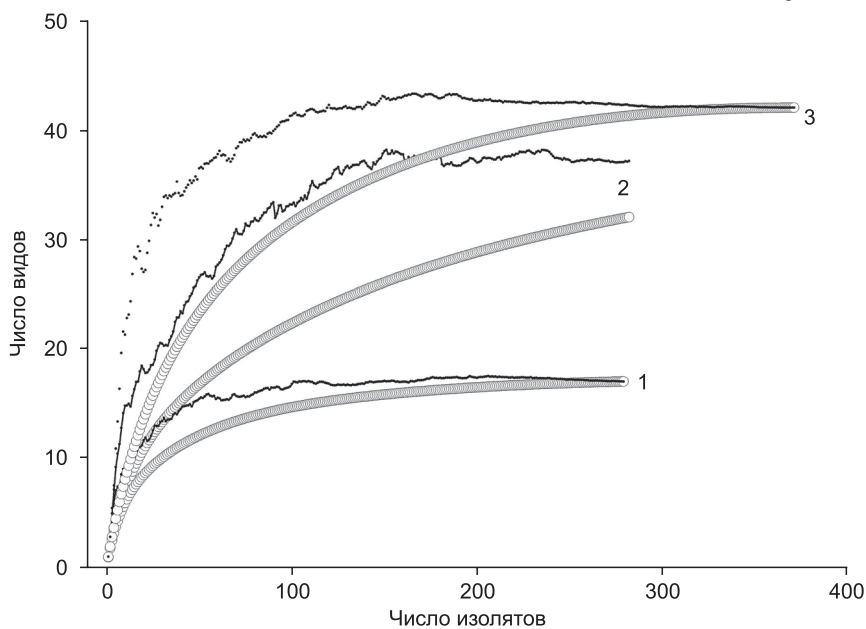


Рис. 3. Результаты бутстреп анализа для оценки числа полного выявления видов микроскопических грибов в районе исследования в зависимости от числа изолятов.

Тонкие линии показывают средние значения индекса Chao1 (ожидаемое число видов микроскопических грибов) по мере увеличения числа изолятов, сплошные линии – сглаженные кривые разрежения (individual-based rarefaction curve) в зависимости от числа выявленных изолятов. (1 – контрольные почвы и грунты; 2 – антропогенно загрязненные почвы и грунты; 3 – антропогенные субстраты).

В меньшей степени был выявлен видовой состав грибов в загрязнённых почвах (Chao1 = 37,14 ± 4,65; 32 вида). Видовое богатство и разнообразие микромицетов уменьшается от антропогенных субстратов (42 вида, $H' = 3,3$; $D = 19,7$) и антропогенных почв (32 вида, $H' = 2,77$; $D = 11,71$) к контрольным почвам (17 видов, $H' = 2,27$; $D = 7,27$).

Анализ обилия основных групп микроскопических грибов в контрольных почвах (не подвергавшихся антропогенному воздействию) показал, что наиболее высокой была доля микромицетов из родов *Aureobasidium*, *Cadophora*, *Geomyces*, *Thelebolus*, *Phoma*. В почвах, подверженных антропогенному воздействию, встречаются как аборигенные, так и инвазивные виды. Наибольшим числом видов представлен род *Penicillium* (16 видов). Из них только 2 вида отмечено в контрольных почвах, 8 видов в антропогенно загрязнённых почвах и 12 на антропогенно привнесённых материалах. Число изолятов заметно увеличивалось в антропогенных местообитаниях. Кроме того, изоляты данного рода выделялись, как правило,

Таблица 3

Доминирующие виды в почвах и грунтах и антропогенно привнесённых материалах в районе Антарктической станции «Мирный»

Контрольные почвы и грунты	Антропогенно загрязнённые почвы и грунты	Антропогенно привнесённые материалы (субстраты)
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud;	<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud;	<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl;
<i>Cadophora malorum</i> (Kidd & Beaumont) W. Gams;	<i>Cadophora malorum</i> (Kidd & Beaumont) W. Gams	<i>Aspergillus ustus</i> (Bainier) Thom & Church;
<i>Geomyces pannorum</i> (Link) Sigler & J.W. Carmich;	<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries;	<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud;
<i>Phoma herbarum</i> Westend <i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.	<i>Geomyces pannorum</i> (Link) Sigler & J.W. Carmich	<i>Cadophora malorum</i> (Kidd & Beaumont) W. Gams;
	<i>Penicillium glabrum</i> (Wehmer) Westling;	<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries;
	<i>Phoma herbarum</i> Westend;	<i>Cladosporium herbarum</i> (Pers.) Link;
	<i>Thelebolus microsporus</i> (Berk. & Broome) Kimbr.	<i>Penicillium aurantiogriseum</i> Dierckx;
	<i>Ulocladium consortiale</i> (Thüm.) E.G. Simmons.	<i>Penicillium canescens</i> Sopp;
		<i>Penicillium glabrum</i> (Wehmer);
		<i>Ulocladium consortiale</i> (Thüm.) E.G. Simmon

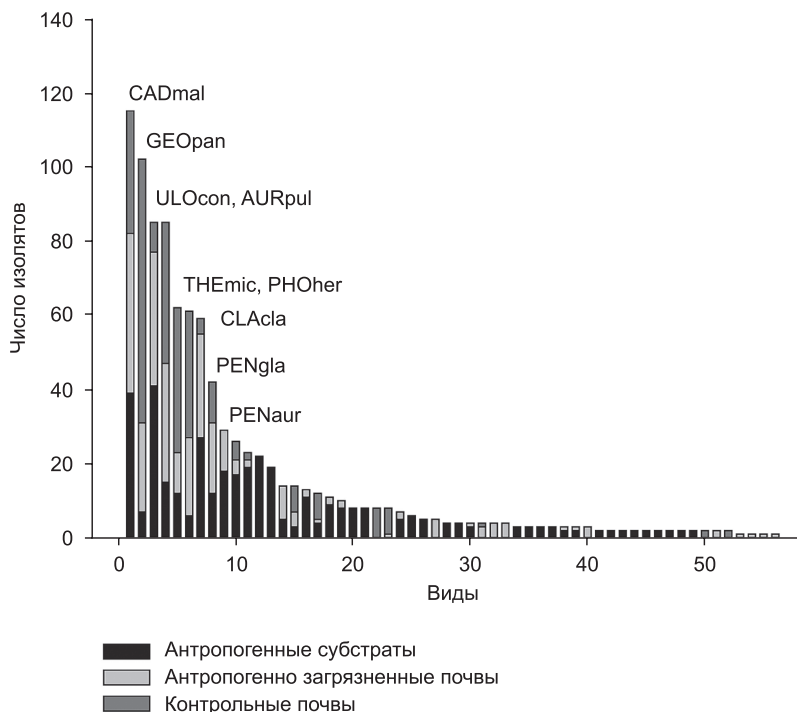


Рис. 4. График рангового распределения видов грибов микроскопических грибов на антропогенных субстратах, в антропогенно загрязненных и контрольных почвах и грунтах.

CADmal – *Cadophora malorum*; GEOpan – *Geomyces pannorum*; ULOcon – *Ulocladium consortiale*; AURpul – *Aureobasidium pullulans*; THEmic – *Thelebolus microsporus*; PHOher – *Phoma herbarum*; CLAcLa – *Cladosporium cladosporioides*; PENgla – *Penicillium glabrum*; PENaur – *Penicillium aurantiogriseum*.

при сравнительно высокой температуре инкубации. Виды рода *Trichoderma* также выделялись регулярно в антропогенно загрязнённых почвах и грунтах Антарктиды. Хотя изоляты этого рода относились к мезофилам, они имели широкую амплитуду роста. Так, минимальная температура роста для них составляла 2–3 °С. В антропогенно загрязнённых грунтах и первичных почвах также выделялись виды родов *Alternaria*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Mucor*, *Ulocladium*, которые практически не отмечались

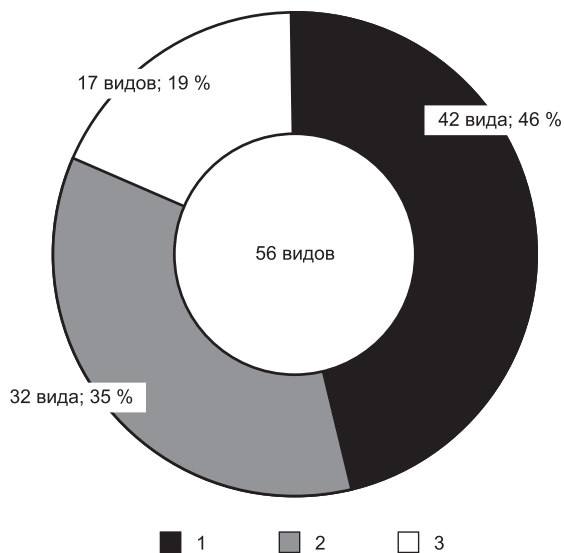


Рис. 5. Число видов микроскопических грибов в образцах почвы и грунта и на антропогенных субстратах (1 – антропогенные субстраты; 2 – антропогенно загрязненные почвы и грунты; 3 – контрольные почвы и грунты).

в контрольных участках. Доминирующие виды микроскопических грибов представлены в табл. 3.

Наиболее отличительной чертой видового спектра сообществ микромицетов в районе станции Мирный (рис. 4, см. табл. 3) является высокая встречаемость супердоминанта *Cadophora malorum* во всех типах почв и преобладание *Geomyces pannorum* в контрольных почвах.

Всего на антропогенных субстратах было отмечено 42 вида микромицетов, в антропогенно загрязнённых почвах – 32 вида, а в контрольных почвах выявлено 17 видов (рис. 5). Только 3 вида грибов из контрольных почв не были отмечены в антропогенно загрязнённых местообитаниях. Таким образом, увеличение числа видов происходило за счет интродукции новых видов, т. е. за счёт антропогенного влияния. Можно предположить, что значительная часть привнесённых микромицетов не участвует в почвенных процессах, а лишь сохраняет жизнеспособность в данных условиях. Однако часть видов, например, виды родов *Alternaria* и *Ulocladium*, несомненно, хорошо адаптировались к данным условиям, т. к. их развитие на поверхности антропогенных материалов (частицы бумаги, ткани и т. д.), находящихся в естественной среде, было многократно визуальное зафиксировано. Стоит отметить, что на поверхности антропогенных материалов активно развивались такие виды, как *Cadophora malorum*, *Geomyces pannorum*, *Thelebolus microsporus*, т.

е. виды, характерные для естественных (незагрязнённых) почв и грунтов Антарктиды. Таким образом, эти виды осваивали новый, ранее недоступный им субстрат и переходили к активной биодеструкции материалов. В связи с тем, что эти виды хорошо адаптированы к экстремальным условиям Антарктиды, в дальнейшем они могут быть причиной процессов биодеструкции материалов и предметов.

Среди микромицетов, выявленных в антропогенно загрязнённых почвах и на антропогенных субстратах, более 80% (рис. 6) могут быть отнесены к условно-патогенным видам (по Санитарно-эпидемиологическим правилам СП 1.3.2322–08 [25], но т. к. большая доля выявленных изолятов относилась к группам психротрофов или психрофилов, это может ограничивать их патогенные свойства. Ряд видов: *Alternaria alternata*, *Chaetomium globosum* виды родов *Aspergillus* и *Penicillium* известны как токсинообразователи.

Кроме того, микроскопические грибы могут быть причиной системных микозов. Особенно опасны они для людей с ослабленным иммунитетом. Почти все эти грибы имеют мелкие споры, которые легко переносятся воздушными потоками как во внешней среде, так и внутри помещений полярных станций.

Полученные данные свидетельствуют о значительном изменении видового состава микроскопических грибов Антарктиды при антропогенном воздействии:

1) отмечено высокое сходство видового состава загрязнённых почв и антропогенных субстратов, что свидетельствует об инвазивном происхождении ряда видов и их переходе к существованию в почвах и грунтах Антарктиды;

2) индикатором модификации микробиоты грунтов и первичных почв может быть общее число микроорганизмов (КОЕ), объем и морфология структуры биомассы, видовой состав сообществ, индикаторные виды.

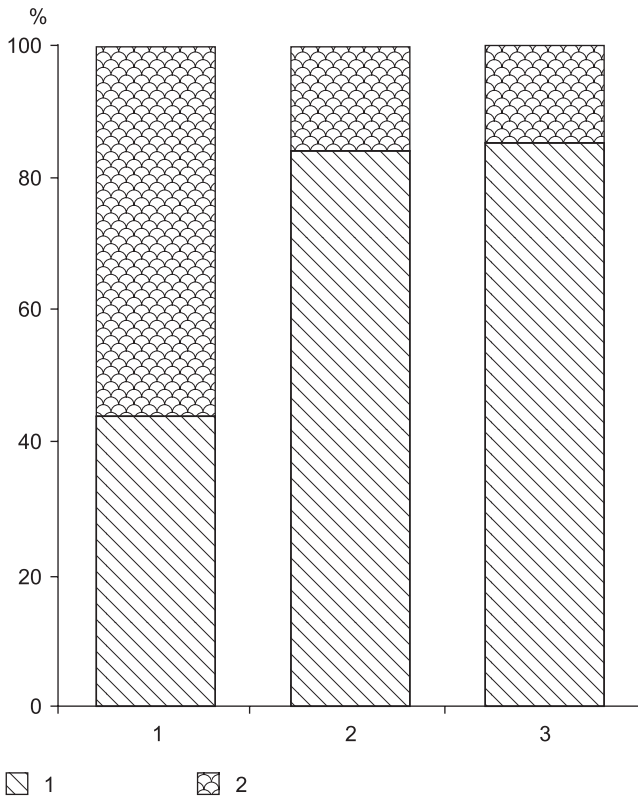


Рис. 6. Доля условно патогенных микроскопических грибов в почвах, грунтах и на антропогенных субстратах в районе антарктической станции «Мирный» (I – контрольные почвы и грунты; II – антропогенно загрязненные почвы и грунты; III – антропогенные субстраты); 1 – доля условно-патогенных микромицетов, 2 – доля микромицетов, не отмеченных как патогенные или условно-патогенные).

Полученные данные свидетельствуют о возможности использования количественных характеристик микробиоты и состава микробных сообществ для оценки состояния окружающей среды и мониторинга полярных экосистем в районах активной хозяйственной деятельности. По-видимому, ликвидация антропогенно привнесённых материалов может снизить инфекционный фон на территории Антарктической станции.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература (п.п. 1–8, 17, 20–22 см. References)

- 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): 135–41.
- Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Крыленков В.А., Соколов В.Т. Аэромикота в районах расположения арктических станций России в акваториях Белого, Баренцевого и Карского морей. *Микология и фитопатология*. 2011; 45(3): 228–39.
- Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Баранцевич Е.П., Крыленков В.А., Соколов В.Т. Распространение терригенных микромицетов в водах Арктических морей. *Микология и фитопатология*. 2012; 46(5): 306–10.
- 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; 48(6): 365–71.
- Кирцидели И.Ю., Абакумов Е.В., Тешебаев Ш.Б., Зеленская М.С., Власов Д.Ю., Крыленков В.А. и др. Микробные сообщества в районах арктических поселений. *Гигиена и санитария*. 2016; 95 (10): 923–9.
- Абакумов Е.В., Лодыгин Е.Д., Габов Д.А., Крыленков В.А. Содержание полициклических ароматических углеводородов в почвах Антарктиды, на примере Российских полярных станций. *Гигиена и санитария*. 2014; 93(1): 30–5.

- Звягинцев Д.В. *Методы почвенной микробиологии и биохимии*. М.: МГУ, 1991.
- Пестова Н.Е., Баранцевич Е.П., Рыбкова Н.С., Козлова Н.С., Баранцевич Н.Е. Изучение эффективности применения метода секвенирования ДНК по фрагменту гена 16S РРНК для идентификации микроорганизмов. *Профилактическая и клиническая медицина*. 2011; (4): 54–5.
- Шитиков В.К., Зинченко Т.Д., Розенберг Г.С. *Макроэкология речных сообществ: концепции, методы, модели*. Тольятти, 2011.
- Орлов Д.С., Гришина Л.А. *Практикум по химии гумуса*. М.; 1981.
- ОСТ 10-259–2000 Почвы. Рентгенофлуоресцентное определение валового содержания тяжелых металлов. М.; 2000.
- СП 1.3.2322–08. Безопасность работы с микроорганизмами III–IV групп патогенности (опасности) и возбудителями паразитарных инфекций. М.; 2008.

References

- Gilichinsky D. Permafrost as a microbial habitat. In: Bitton G. *Encyclopedia of Environmental Microbiology*. New York: Wiley; 2002: 932–56.
- Lopatina A., Krylenkov V., Severinov K. Activity and bacterial diversity of snow around Russian Antarctic stations. *Res. Microbiol.* 2013; 164(9): 949–58.
- 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.
- Bargagli R. Environmental contamination in Antarctic ecosystems. *Sci. Total Environ.* 2008; 400: 212–26.
- Ott S. The diversity of colonising diaspores at an Antarctic inland site implication for ecosystem development. In: *Polar Research – Arctic and Antarctic perspectives in the International Polar Year*. St. Petersburg; 2008.
- 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; 38: 3057–64.
- Arenz B.E., Held B.W., Jurgens J.A., Blanchette R.A. Fungal colonization of exotic substrates in Antarctica. *Fungal Divers.* 2011; 49(1): 13–22.
- Oszczko P., Mleczo P., Karasinski D., Chlebicki A. Timber transported to Antarctica: a potential and undesirable carrier for alien fungi and insects. *Biol. Invasions.* 2012; 14: 15–20.
- Zelenskaya M.S., Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Krylenkov V.A., Sokolov V.T. Micromycetes – Biodestructors in ecosystems of the Arctic. *Problemy regional'noy ekologii*. 2013; (5): 135–41. (in Russian)
- Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Krylenkov V.A., Sokolov V.T. Aeromikota in locations of the Russian Arctic stations in the water areas of the White, Barents and Kara Seas. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2011; 45(3): 228–39. (in Russian)
- Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Barantsevich E.P., Krylenkov V.A., Sokolov V.T. Distribution of terrigenous microfungi in arctic seas. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2012; 46(5): 306–10. (in Russian)
- Kirtsideli I.Yu., Vlasov D.Yu., Barantsevich E.P., Krylenkov V.A., Sokolov V.T. Complexes of microscopic fungi in soils of polar islands Izvestiy TSIK (Kara Sea). *Mikologiya i fitopatologiya*. 2014; 48(6): 365–71. (in Russian)
- Kirtsideli I.Yu., Abakumov E.V., Teshebaev Sh.B., Zelenskaya M.S., Vlasov D.Yu., Krylenkov V.A., et al. Microbial communities in regions of the arctic settlements. *Gigiena i sanitariya*. 2016; 95 (10): 923–9. (in Russian)
- Abakumov E.V., Lodygin E.D., Gabov D.A., Krylenkov V.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in Antarctica soils as exemplified by the Russian Polar stations. *Gigiena i sanitariya*. 2014; 93(1): 30–5. (in Russian)
- Zvyaginets D.V. *Methods of Soil Microbiology and Biochemistry [Metody pochvennoy mikrobiologii i biokhimii]*. Moscow; 1991. (in Russian)
- Pestova N.E., Barantsevich E.P., Rybkova N.S., Kozlova N.S., Barantsevich N.E. Study of effectiveness of sequences of fragment of 16S RRNA gene in identification of microorganisms. *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina*. 2011; (4): 54–5. (In Russian).
- Colwell R.K., Chao A., Gotelli N.J., Lin S.Y., Mao C.X., Chazdon R.L., et al. Models and estimators linking individual-based and sample based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. *J. Plant. Ecol.* 2012; 5(1): 3–21.
- Shitikov V.K., Zinchenko T.D., Rozenberg G.S. *Macroecology of River Communities: Concepts, Methods, Models [Makroekologiya rechnykh soobshchestv: kontseptsii, metody, modeli]*. Tol'yatti; 2011. (in Russian).
- Orlov D.S., Grishina L.A. *The Practice of Chemistry of Humus [Praktikum po khimii gumusa]*. Moscow; 1981. (in Russian)
- U.S. Environmental Protection Agency. Method 8310: Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, 1986.
- U.S. Environmental Protection Agency. Evaluation and estimation of potential carcinogenic risks of polynuclear aromatic hydrocarbons: carcinogen assessment group. Washington DC: Office of Health and Environmental Assessment; 1995.
- U.S. Environmental Protection Agency. Method 3550b: Ultrasonic extraction. Washington DC: Office of Health and Environmental Assessment; 1996.
- U.S. Environmental Protection Agency. Method 3630: Silica gel cleanup. Washington DC: Office of Health and Environmental Assessment; 1996.
- OST 10-259–2000. Soil. X-ray fluorescence determination of the gross content of heavy metals. Moscow; 2000. (in Russian)
- Sanitary rules SP 1.3.2322–08. Security work with microorganisms of III–IV pathogenicity groups (hazard) and agents of parasitic infections. Moscow; 2008. (in Russian)

Поступила 25.04.17

Принята к печати 05.07.17