Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук

На правах рукописи

Научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации)

«МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ГРИБЫ НА ДРЕВЕСНЫХ СУБСТРАТАХ ПРИБРЕЖНЫХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИИ»

по направлению подготовки
06.06.01 Биологические науки
направленность (профиль)
03.02.12. Микология

Аспирант **Панькова Инна Геннадьевна**

Научный руководитель д.б.н., Кирцидели Ирина Юрьевна

Санкт-Петербург – 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Перемещение плавника в Арктических морях, которые происходило и происходит уже сотни, а может быть тысячи лет привело к накоплению больших объемов древесины на побережьях и островах северных морей. Из-за изменения климата, повышение температуры и таяние вечной мерзлоты в арктических регионах увеличивается скорость биодеструкции органических материалов. (Blanchette et al., 2016) В почвах, субстратах и вечной мерзлоте Арктических территорий происходило накопление большие количества органического углерода, (Shepelev et al., 2020) и микробная активность, в том числе активность грибов биодеструкторов в Арктике, чрезвычайно важна как для жизнедеятельности человека, так и для биосферных процессов, поскольку может проходить при низких температурах.

Хотя экстремальные условия и низкие температуры полярных регионов ограничивает скорость микробного разложения материалов, исследования плавников и других видов древесины, привезенных в Арктику или Антарктику показали, что грибы на этом субстрате в естественных экосистемах могут со временем вызывать значительную деградацию древесины (Blanchette et al., 2010). Процессы биодеструкции древесины в высоких широтах могут происходить как за счет инвазивных видов (Vlasov et al., 2019, 2020), так и за счет аборигенных микроскопических грибов, которые способными расти и разлагать древесные материалы (Jurgens et al., 2009). Хотя микробное разложение древесины чрезвычайно важный процесс, микроорганизмы, ответственные за разложение органических материалов в Арктике, плохо изучены (Timling и Taylor, 2012). Существует потребность в расширении знаний о биоразнообразии и функционировании экосистем в холодных климатических зонах, где исследования микробной экологии были ограничены (Tosi et al., 2005).

Древесина плавника накопленная на арктических побережьях Северного ледовитого океана, использовались коренными народам Севера как строительный материал и источник топлива. В настоящее время деревянные конструкции являются важными строительными материалами при освоение Арктики, но их сохранение часто затруднено из-за проблем биодеструкции. Древесина может быть поражена большим количеством разнообразных микроорганизмов, а воздействие окружающей среды, создает условия, благоприятствующие гниению. Гниение древесины, составляющей конструкции зданий и сооружений, лучше всего известно и изучено в тропических регионах и средних широтах, но также является проблемой в районах с экстремальными экологическими условиями, таких как полярные регионы. Микроорганизмы и процессы биодеструкции, происходящие в экосистемах с экстремальными условиями, плохо изучены, и информация об исследовании деревянных конструкций, необходима для обеспечении их сохранности. Полученные данные также могут

обеспечить лучшее понимание биологии и экологии микроскопических грибов и привести к более глубокому пониманию их роли в этих экстремальных экосистемах. (Stchigel et al., 2003, Tosi et al., 2005)

Поскольку антропогенно привнесённая древесина доставлялась как правило из Европы можно было предположить наличия базидиальных (аффилофоровых) грибов вызывающих бурую гниль древесины, которые являются наиболее распространенными разрушителями зданий в средних широтах, однако они практически не были обнаружены Blanchette et al., 2010. В то же время древесина, продовольствие и другие изделия, также предполагает, наличие инвазивных видов микроскопических грибов и других микроорганизмов, вызывающих биодеструкцию материалов.

Наши исследования посвящены вопросам изучения разнообразия и экологии арктических грибов на древесине плавника и антропогеннопривнесенной древесине, а также получения дополнительной информации об их возможном происхождении, о микробном разнообразии региона и о роли этих грибов в функционировании экосистемы.

Цель и задачи исследования. Провести исследования таксономического разнообразия и экологических особенностей микроскопических грибов на древесных субстратах различного генезиса в условиях Арктики. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

Задачи:

1) Изучить видовой состав и количественные соотношения микроскопических грибов на древесных субстратах в арктической зоне. Провести сравнение между комплексами микроскопических грибов на древесных субстратах в различных природных зонах Российской Арктики.

2) Выявить закономерности распространения микроскопических грибов на древесине плавника в условиях Арктики.

3) Выявить закономерности формирования комплексов микромицетов на антропогенно-привнесенной древесине.

4) Рассмотреть адаптационный потенциал микроскопических грибов биодеструкторов к условиям Арктики. Изучить физиологические особенности выделенных микромицетов. Исследовать способность изолятов продуцировать вторичные метаболиты (способность к лигнинолитической (оксидазной), целлюлазолитической, амилолитической активности). Охарактеризовать потенциальную ферментативную активность ряда штаммов типичных видов микромицетов Арктики при различных температурных условиях культивирования. Оценить влияние микроскопических грибов на деструкцию антропогенно-привнесенной древесины и плавника.

Научная новизна. Впервые проведено исследование микобиоты плавника в различных климатических зонах Российской Арктики. Впервые получены данные о биоразнообразии микромицетов на древесных субстратах островов архипелагов ЗФИ, Новая Земля, Северная земля, о. Визе. Впервые проведено сравнительные исследования микобиоты на древесине Арктических островов. Впервые рассмотрен вопрос приуроченности микромицетов к различным породам древесины плавника. Проведено сравнение микобиоты древесины плавника и антропогенно привнесённой древесины в условиях высокой Арктики. Изучены особенности адаптации микроскопических грибов к древесным субстратам в условиях Арктики. Впервые проведено исследование антифунгальных свойства биоцидов разработанных в филиале НИЦ «Курчатовский институт»–ПИЯФ–ИХС РАН. Было исследовано влияние биоцидов на основе наносеребра (Ag), бромистого тетробутиламмония (ЧАС), карбоксилата Mn (Mn), MnL_1, MnL_2, MnL_3.

В результате исследования микобиоты на древесных субстратах ЗФИ было описано два новых для науки вида микроскопических грибов

Теоретическая и практическая значимость работы.

В ходе исследования были получены новые данные о разнообразии и развитии микобиоты на древесине плавника и антропогенно привнесенной древесине в условиях Арктики.

Практическое значение работы определяется поиском микромицетов, обладающих высокой активностью лигнолитических (оксидазных) и целлюлозолитических ферментов, способных к функционированию при низких температурах.

Кроме того, было приведено исследование и тестирование биоцидов на основе наносеребра (Ag), бромистого тетробутиламмония (ЧАС), карбоксилата Mn (Mn), MnL_1, MnL_2, MnL_3. для защиты древесины для использования в условиях арктических территорий.

Коллекция микроскопических грибов Лаборатории систематики и географии грибов Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН была пополнена новыми штаммами, которые доступны для дальнейшего научного изучения.

Помимо этого, полученные результаты могут быть использованы при решении вопросов экологии и географии микроскопических грибов.

Методология и методы исследования. Работа основана на сравнении биоразнообразия микроскопических грибов, выделенных из древесины плавника и антропогенно привнесенной древесины арктических территорий, работа включает как идентификацию отдельных видов, так и оценку микобиоты на географическом градиенте и экологических факторов, анализ полученных массивов данных. В ходе работы были

использованы классические методы изоляции микромицетов, исследования чистых культур, светового и сканирующего микроскопирования. Также были применены современные молекулярно-генетические методы (получение нуклеотидных последовательностей, построение филогенетических деревьев и их анализ). Анализ физиологических особенностей микромицетов был проведен чашечным методом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Древесина плавника и антропогенно привнесенная древесина арктических территорий характеризуются сравнительно низким видовым разнообразием комплексов микромицетов.
2. При продвижении с севера на юг происходят изменение в составе и структуре комплексов микроскопических грибов на древесине плавника, в частности, отмечено увеличение доли изолятов и видового разнообразия микромицетов рода *Penicillium, Trichoderma, Fusarium* и снижение доли дрожжевых форм микроскопических грибов.
3. По мере заселения древесины происходит накопление психрофильных и психротрофных культивируемых микроскопических грибов, обладающих способностью к ферментативному разложению лигнина и целлюлозы, которые могут быть использованы как перспективные продуценты биологически активных веществ. Проявление ферментативной активности во многих случаях существенно различается у изолятов одного вида

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается большим объемом полученных оригинальных данных, их статистической и биоинформатической обработкой, а также публикацией научных статей в рецензируемых журналах.

Основные результаты исследований были представлены на следующих всероссийских и международных конференциях и съездах: VI (XIV) Международной ботанической конференции молодых ученых в Санкт-Петербурге (Санкт-Петербург, 2025); Международная Мемориальная микологической конференция «Современная микология в России» (Москва, 2025); IX Всероссийского конгресса по медицинской микробиологии, клинической микологии и иммунологии (XXVIII Кашкинские чтения) (Санкт-Петербург, 2025); VIIIВсероссийского конгресса по медицинской микробиологии, клинической микологии и иммунологии (XXVII Кашкинские чтения) (Санкт-Петербург, 2024); Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук и 35-летию Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (Апатиты, 2024); VII Всероссийского конгресса по медицинской микробиологии, клинической микологии и иммунологии (XXVI Кашкинские чтения) (Санкт-Петербург, 2023);Всероссийская научная конференция с международным участием «Экология грибов и грибоподобных организмов: факты, гипотезы, тенденции», посвященная 300-летию

Российской академии наук (Ярославль, 2023); VI Всероссийского конгресса по медицинской микробиологии, клинической микологии и иммунологии (XXV Кашкинские чтения) (Санкт-Петербург, 2022); V (XII) Международной ботанической конференции молодых ученых в Санкт-Петербурге (Санкт-Петербург, 2022); Пятый съезда микологов России (Москва, 2022), а также на заседаниях Лаборатории систематики и географии грибов БИН РАН.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

В обзоре литературы приведены сведения об истории микологических исследований Арктике, рассмотрены исследования грибов в морях Северного Ледовитого океана, на древесине плавника в Арктике, на антропогенно- привнесенной древесине в высоких широтах и вопросы деструкции древесины.

Глава 2. Материалы и методы исследования

Места отбора образцов. Исследованию охватили как зону полярных пустынь (архипелаг Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), архипелаг Северная Земля, остров Визе, северные острова архипелага Новая земля), так и часть тундровой зоны (материковая часть побережья Баренцева моря в районе пос. Териберка, материковая часть побережья моря Лаптевых в районе пос. Тикси, южная часть архипелага Новая земля). В работе рассмотрены географические условия в районах отбора образцов

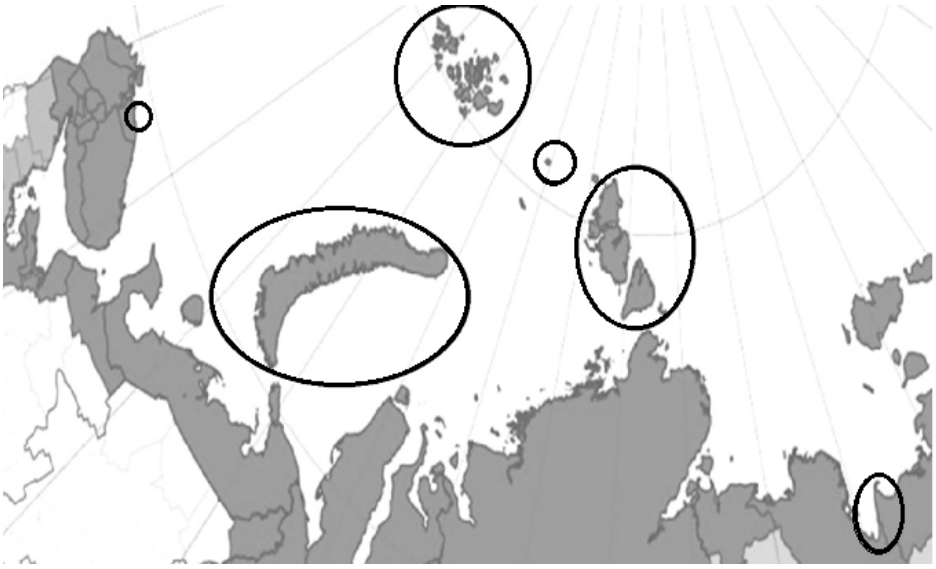


Рис.1. Места отбора образцов.

Выделение микромицетов. Анализ образцов проводили после их доставки в БИН РАН стандартным микробиологическим методом посева мелких участков древесины на стандартные и модифицированные питательных среды: среда Чапека-Докса, Среда Сабуро,

(Методы…, 1991).модифицированную Среду Гетчинсона целлюлозой и 5% NaCl (с добавлением гентамицина или хлорге…) Инкубацию проводили в темноте при температуре +5 и +20С. Учет выросших колоний микромицетов и выделение в чистые культуры проводили на 7-15 сутки роста, для температуры 20 С и на 30 сутки роста, для температуры 5 С дополнительно чашки просматривали на 25 и 60 день для выявления медленно растущих видов.

Хранение культур. Чистые культуры микромицетов помещены на хранение в морозильной камере (-80ºС). Участки мицелий и массу спор переносили в микропробирки (1,5 -2 мл) в раствор криопротектора (20% раствор глицерина с добавлением TWEEN 20).

Морфологическая идентификация. Для идентификации использовали общепринятые определители, ревизии отдельных родов и описания новых видов. Наименования и систематическое положение дано в соответствии с базами данных Index Fungorum (http://www.indexfungorum.org) и The Myco Bank Fungal databases (http://www.mycobank.org) по состоянию на май 2025 года.

Молекулярная идентификация. Для значительной части культур были применены молекулярные методы. Как правило, в качестве филогенетического маркера была использована последовательность региона ITS (White et al., 1990). Геномную ДНК экстрагировали из мицелия используя лизирующий буфер, ПЦР проводили с использованием готовой смеси ScreenMix (ООО «Евроген», Россия) По окончании амплификации проводили детекцию образцов электрофоретическим методом в 1.5%-м агарозном геле с GelRed. Секвенирование полученных фрагментов ДНК проводили методом Сэнгера. Полученные последовательности ДНК были попарно выравнены и объединены в программе MEGA11. Поиск сходных нуклеотидных последовательностей проведен по базе данных NCBI (GenBank) при помощи программы BLAST. Вновь полученные последовательности ДНК, были депонированы в GenBank. Для универсального региона ITS были выбраны критерии идентичности, предложенные Годинье с соавторами (Godinho et al., 2013).

Определение ферментативной активности выделенных изолятов микроскопических грибов. Определение ферментативной активности выделенных изолятов микроскопических грибов проводили чашечными методами: применяли методы определения оксидазной (лигнинолитической), целлюлозолитической, амилолитиечкой активности, для ряда изолятов выделенных их антропогенно привнесенной древесине использованы также методы определения фосфолипазной и гемолитической активности, а также тестирование на рост при температуре 37С.

Изучение влияния и свойств биоцидов на микроскопические грибы с древесины Арктики. Определение фунгистатической и фунгицидной активности биоцидов проводили

методом серийных разведений с использованием 96-луночных микротитровальных планшетов (метод микроразведений) Влияние различных концентраций биоцидов на рост микромицетов проводили чашечным методом, использую агаризированную среду с добавлением различных концентраций биоцидов.

Использовался метод сканирующей микроскопии для изучения особенностей распределения грибов на образцах древесины. Образцы готовили по специальной методике (Wiktor et al., 2009). Материалом для исследования служили небольшие фрагменты древесины с признаками развития мицелия и колониями грибов. Их обезвоживали в серии этанолов (30, 50, 70, 95% по 10 мин каждый). Образцы высушивали на воздухе, а затем покрывали углеродом с помощью высоковакуумного углеродного распылителя Q150TE. Наблюдения проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM3000 в «Ресурсном центре микроскопии и микроанализа» Санкт-Петербургского государственного университета.

Глава 3 Исследование микроскопических грибов на древесине плавника и антропогенно првнесенной древесине островов архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ)

Одной из самых северных и удаленных наземных территорий России являются острова архипелага Земля Франца-Иосифа (ЗФИ).. При исследовании древесины с островов архипелага ЗФИ использовался метод сканирующей электронной микроскопии, что показало наличие развитие микроскопических грибов в поверхностных и в глубинных слоях древесины (рис.2) Это не только позволило наглядно показать активное развитие микромицетов на древесине в условиях высокой Арктики, но и подтвердить наличие конидиального спороношения грибов на антропогенно привнесенной древесине и древесине плавника.

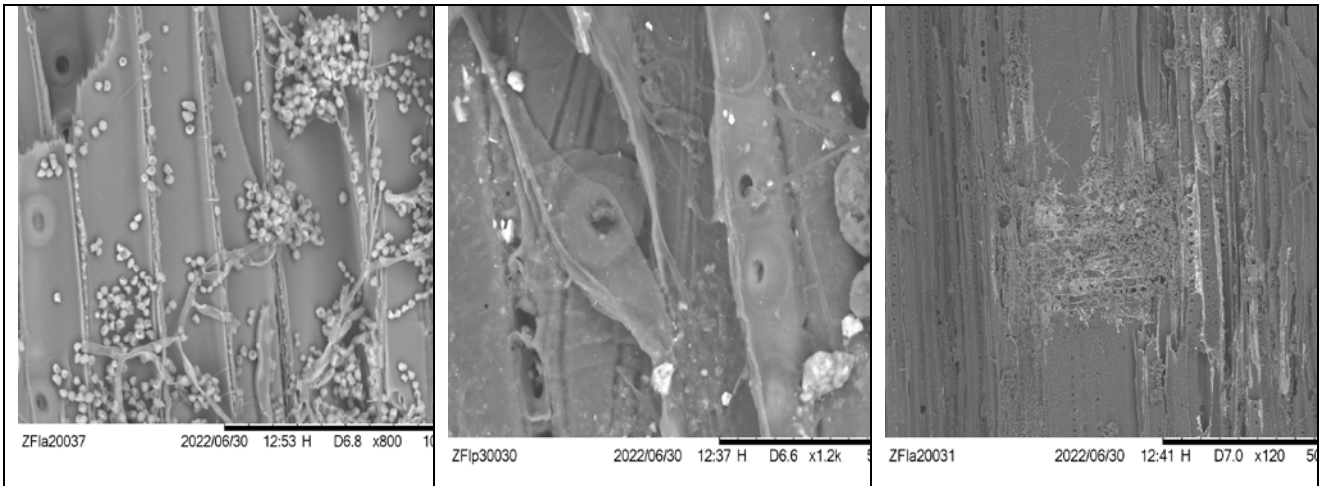


Рис. 2. Развитие микроскопических грибов на поверхности древесины.

В результате культурально-морфологических исследований было выделено в чистую культуру более 300 изолятов, которые были идентифицированы как 61 вид микроскопических грибов.

Отдел Mucoromycota представлен 7 видами родов *Mucor, Rizopus, Pirella,*. И составляют около 11,47 % от всех выделенных видов.

Basidiomycota была представлена 8 видами микроскопических грибов, что согласуется с литературными данными о низкой встречаемости базидиомицетов в полярных экосистемах. Виды *Cystobasidium ongulense, Goffeauzyma gilvescens, Naganishia liquefaciens, Piskurozyma yama, Phenoliferia glacialis, Rhodotorula mucilaginosa, Rhodosporidiobolus colostri, Tremella indecorata* были дрожжевыми формами грибов. Эти виды составляли 13,11% всех выделенных видов и ранее отмечались преимущественно в почвах высоких широт. Большинство микроскопических грибов базидиомицетов с дрожжевыми и диморфными формами относятся к недавно описанным видам, что может свидетельствовать о недооценке роли дрожжевых форм среди культивируемых микромицетов в высоких широтах. Использование метода влажных камер показал, что примерно 10% всех исследованных образцов плавника содержит КОЕ аффилофоровых базидиальыных грибов. Основное место в микобиоте древесных субстратов занимали представители Ascomycota (46 видов, 75,5%). Среди аскомицетов также отмечены дрожжеподобные грибы *Exophiala xenobiotica, Phaeococcomyces nigricans, Neocelosporium eucalypti, Sydowia polyspora*.

Наибольшим числом видов представлен род *Penicillium* (9 видов), высокой была доля микромицетов из родов *Cadophora* (*C. fastigiata, C. luteo-olivacea, C. malorum, C. melinii, C.arctica.*). Четыре вида данного рода отмечались и на древесине плавника и на антропогенно привнесенной древесине, а вид *C. arctica* выделен с древесины плавника и описан нами как новый для науки вид (Iliuchin et al., 2024) Наибольшая встречаемость отмечена для *C. luteo-olivacea и C. melinii,* как на плавнике, так и на антропогенно привнесенной древесине. В изученных пробах постоянно присутствовал аскомицет *Pseudogymnoascus pannorum,* Расчет показателей, оценивающих полное видовое богатство микромицетов (степень изученности видового состава, выявляемого культуральными методами) (рис.3) показал, что для древесины плавника доля изученных видов составляла 96% , а для антропогенно привнесенной древесины практически 100%.

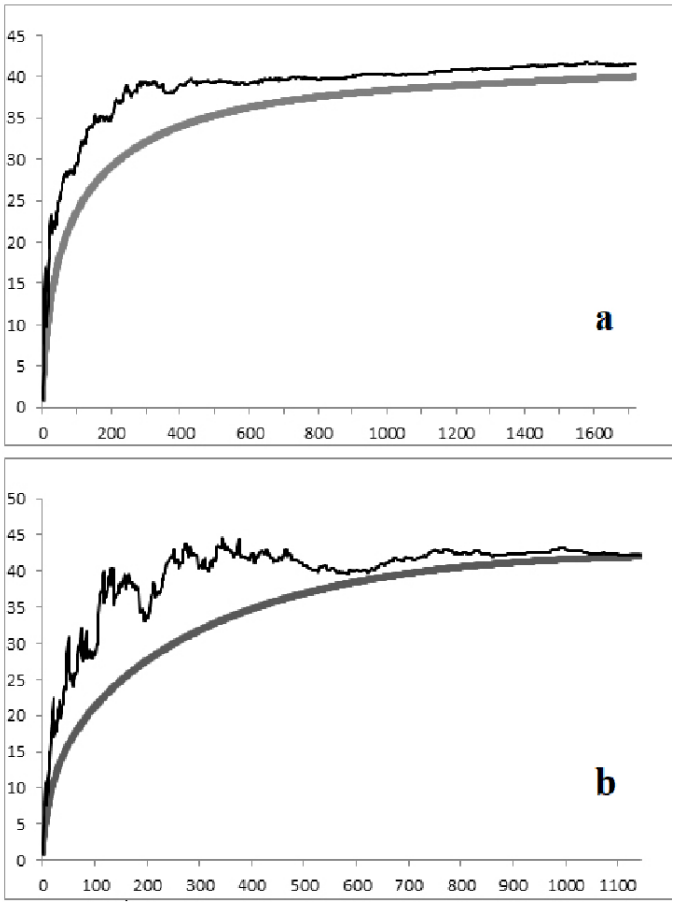


Рис.3. Результаты бутстреп анализа для оценки числа полного выявления видов в районе исследования в зависимости от числа изолятов. Тонкие линии показывают средние значения индекса Chao1 (ожидаемое число видов) по мере увеличения числа изолятов, сплошные линии – сглаженные кривые разрежения (individual-based rarefaction curve) в зависимости от числа выявленных изолятов; а- общие средние для древесины плавника, б- общие средние для антропогенно привнесенной древесины

Данный показатель для отдельных островов показал, что при однократном исследовании доля изученных микромицетов составляет от 83 до 100% для микромицетов плавника и от 70% до 100% для антропогенно привнесенной древесины, что говорит о сравнительно высокой гетерогенности видового состава микромицетов изучаемых экстремальных территорий высоких широт. Это может быть связано с составом плавника и/или условиями прибрежных и подводных почв, где условия для развития микромицетов менее однородны. Условия формирования комплексов микромицетов на антропогенно привнесенной древесине в некоторых случаях могут быть более разнородными, что связано с антропогенным фактором и путями транспортировки древесины.

Сравнение видового состава культивируемых микроскопических грибов древесины плавника и антропогенно привнесенной древесины на архипелага ЗФИ показало ограниченное сходство видового состава микромицетов изученных древесных субстратов, При сравнении общих видовых списков, выявленных с древесины плавника и антропогенно привнесенной древесины можно отметить 21 общий вид, что составляет около 34% от всех выделенных видов, (плавник 40, антропоген 42 всего 61вид)

Распределение основных групп микроскопических грибов на древесине архипелага ЗФИ наиболее наглядно представлено на диаграмме рангового распределения микроскопических грибов рис. 4

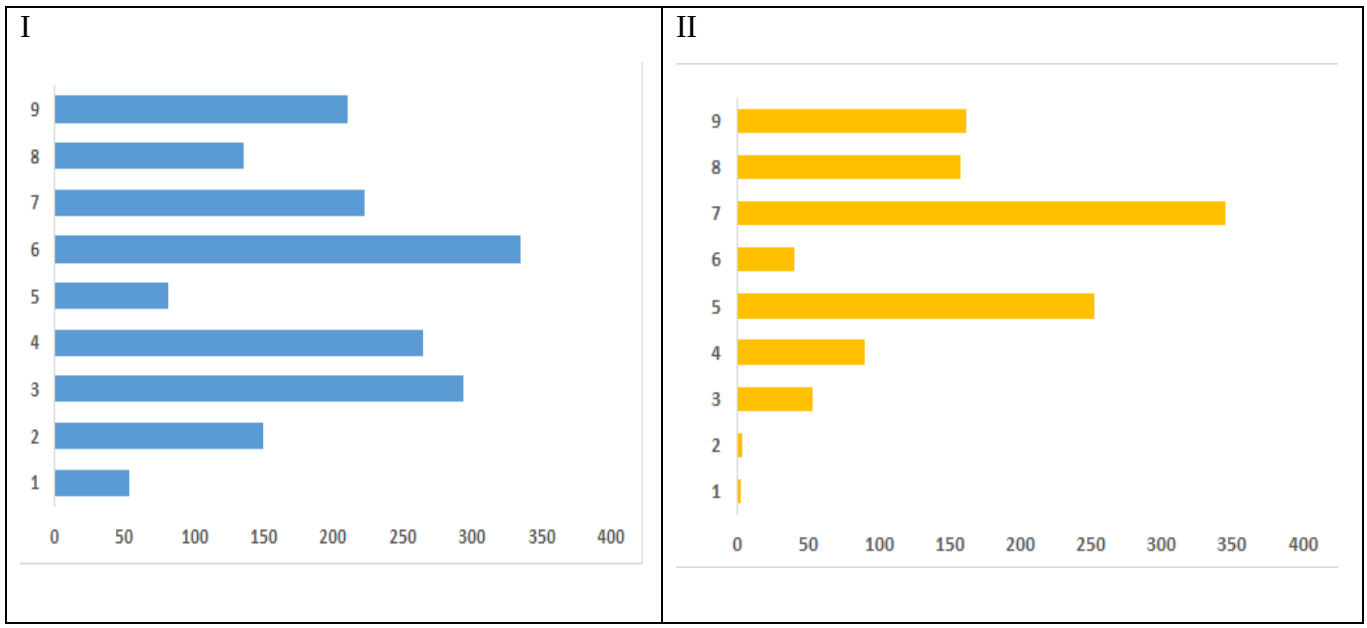


Рис.4 График рангового распределения микроскопических грибов в изученных образцах древесины (I) – древесина плавника.; (II) – Антропогеннопривнесенная древесина
По горизонтали – число изолятов. По вертикали ранжированы микроскопические грибы: роды: 1- *Leptosphaeria* spp. 2- *Xenopolyscytalum* spp. 3- *Thelebolus* spp. 4- *Pseudogymnoascus* spp. 5 - *Penicillium* spp. 6- *Goffeauzyma* spp. 7- *Exophiala* spp. 8- *Cladosporium* spp 9 -*Cadophora* spp.

Если рассматривать формирование комплексов микромицетов на древесине плавника с применением метода корреляционных плеяд, (рис.5), то прослеживается следующая закономерность, наибольшее сходство комплексов отмечалось между микромицетами древесины плавника в районе о.Гукера, о. Королевского общества и о. Бэл., а также между о. Гукера и о.Нортбрук. Замкнутые плеяды, в экстремальных условиях, как правило, характерны для более устойчивых сформированных сообществ (Жданова и др., 2013)

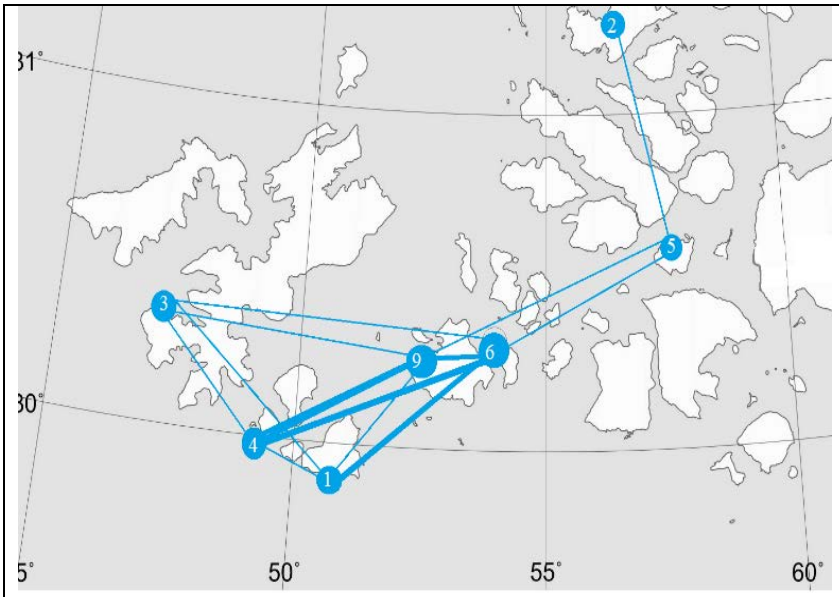


Рис.5 Корреляционные плеяды для комплексов микромицетов формирующихся на древесине исследованных островов
1-о.Кор. общ; 2-о. Джексона; 3- о.Георга; 4-о. Бэл; 5 – о. Хейса; 6-о. Гукера; 7.-о. Ева – Лив; 8-Рудольфа; 9-о. Нортбрука Западный; 10-Гонглое. Толстые линии положительная корреляция более 0,5, тонкие положительная корреляция от 0,2 до 0,5

При проведении исследований при с применением метода ординация грибных сообществ (рис.6), которое было выполнено отдельно для образцов из антропогенно привнесенной древесиной и древесиной плавника было показано, что общая доля объясненной дисперсии в

ординации сообществ плавниковой древесины выше, чем в антропогенной и составила 40,8%. Это указывает на большее сходство сообществ между собой. Точки образцов из древесины разных видов деревьев не образуют отдельных кластеров, что указывает на отсутствие различий между сообществами в древесине разных видов. Наиболее сходными являются грибные сообщества в древесине ели

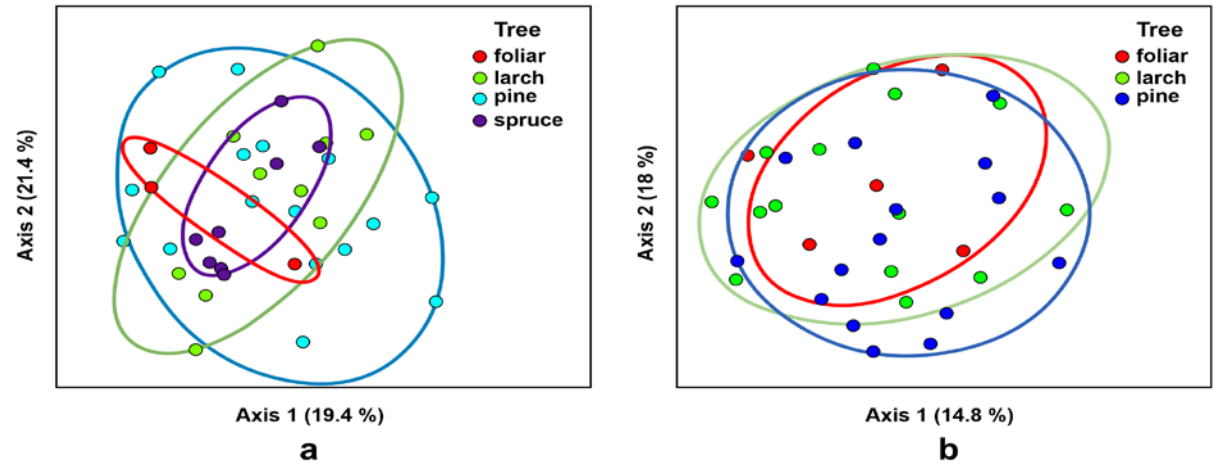


Рис.6 Результат применении метода ординация грибных сообществ на основе анализа встречаемости видов на четырех породах древесины плавника. Точки представляют ординацию микрогрибковых комплексов. а- древесина плавника, б-антропогенно привнесенная древесина

Не отмечено четкой приуроченности к определенным породам что можно объяснить долгим пребыванием в морской воде и воздействием осадков (снег, дождь) на антропогенно привнесенную древесину, что в конечном итоге приводит к отсутствию растворимых органических веществ и увеличению доли целлюлозы и лигнина в древесине, как фактору отбора микроскопичсеких грибов адаптированных к данному субстрату.

При изучении микроскопических грибов, разрушающих древесину, большой интерес представляют ферменты, способствующие данному процессу. Полученные нами результаты исследования ферментативной активности микроскопических грибов приведены на рис.7,8.

В ходе проведенных нами экспериментов было обнаружено, что уровни ферментной активности полученных изолятов незначительно изменяются с течением времени. Изучение лигнинолитической активности показало ее наличие у 16 изолятов (50%), однако существенных значений она достигала у *Hormodendrum* sp., *Pseudogymnoascus pannorum, Cadophora luteo-olivacea, Ochrocladosporium frigidarii, Phoma herbarum, Cadophora melini, Xenopolyscytalum pinea* (виды указаны в порядке снижения ферментативной активности). Стоит отметить, что различные изоляты одного вида показали разные уровни лигнинолитической активности. Так у изолятов *Cadophora luteo-olivacea* (ID-116 и ID-138) значение коэффициентов лигнинолитической активности колебалось от 0,7 до 0,9 соответственно, а у изолятов *Ochrocladosporium frigidarii* (ID-103 и ID-203) от 0,3 до 0,6. У

разных изолятов *Exophiala xenobiotica* и *Pseudogymnoascus pannorum* может отмечаться как сравнительно высокая способность к лигнинолитической активности, так и ее полное отсутствие.

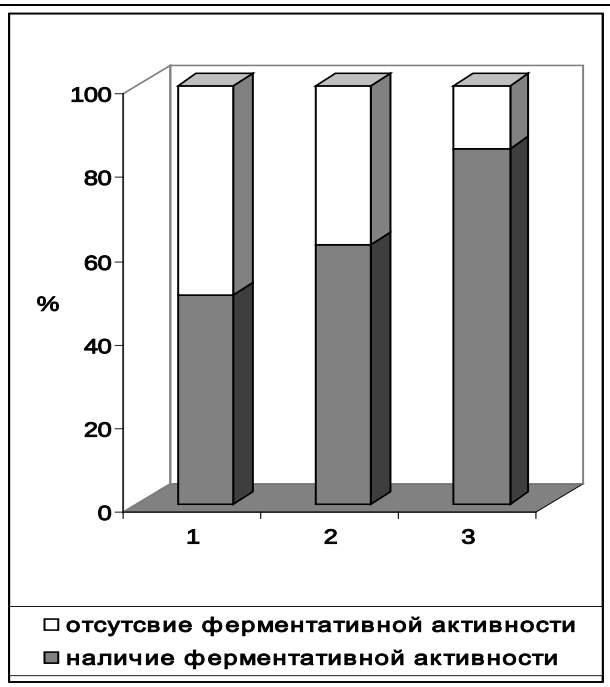


Рис.7 Ферментативная активность исследуемых видов микроскопических грибов.

1 – лигнинолитическая активность; 2 – амилолитическая активность; 3 – целлюлозолитическая активность.

Целлюлозолитическая активность ярко проявлялась у изученных микромицетов и была отмечена у 27 исследованных изолятов (85 %). При этом существенных значений она достигала у изолятов *Alternaria alternata, Cephalotrichum nanum, Penicillium lividum, Pseudogymnoascus pannorum, Acremonium* sp., *Goffeauzyma gilvescens, Cadophora luteo-olivacea, Ochrocladosporium frigidarii, Phoma herbarum* и ряда других (виды указаны в порядке снижения ферментативной активности). Стоит отметить, что различные изоляты одного вида также показали разные уровни целлюлозолитической активности.

Из 32 исследованных изолятов только один (*Phaeococcomyces nigricans*) показал полное отсутствие способности к разложению лингина, целлюлозы и крахмала, 10 изолятов (31%) показали положительную реакцию в одном из тестов, 9 изолятов (27,9%) продемонстрировали положительную реакцию в двух тестах, а 12 изолятов (37,2%) показали положительную реакцию во всех трех тестах. Эти изоляты относились к видам *Exophiala xenobiotica, Ochrocladosporium frigidarii, Phoma herbarum, Cadophora luteo-olivacea, Hormodendrum* sp., *Pseudogymnoascus pannorum, Xenopolyscytalum pinea.*

Полученные данные свидетельствуют о том, что при формирование комплексов микромицетов на древесине в арктических экосистемах, происходит заселение древесины видами, типичными для почв Арктики и вторично-водными микроскопическими грибами (преимущественно аскомицетами).

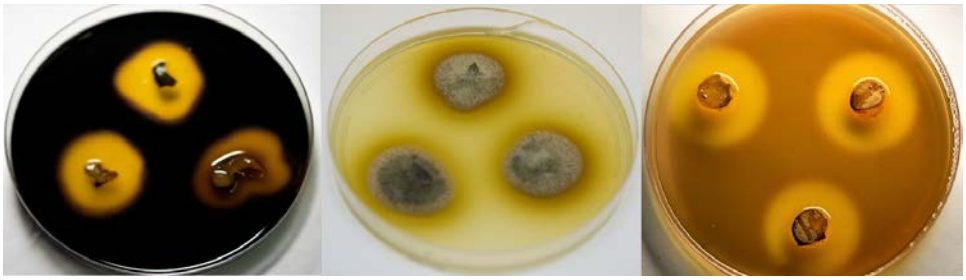


Рис. 8. Ферментативная активность штаммов (примеры результатов экспресс-тестов): 1 – амилазная активность *Cadophora melinii* (ID-135); 2 – лигнинолитическая активность *Ochrocladosporium frigidarii* (ID-203); 3 – целлюлозолитическая активность *Exophiala xenobiotica* (ID-115).

Можно сделать вывод, что хотя древесина является привнесенным субстратом в высоких широтах Арктики, она является источником новых видов и зоной накопления видов, обладающих свойствами биодеструкторов.

Исследования древесины на других локациях проводились аналогично исследованиям на островах архипелага ЗФИ и информация в данном докладе приводиться кратко.

Глава 4_ Исследование микроскопических грибов на древесине плавника островов архипелага Новая Земля.

В результате культурально-морфологических исследований было выделено более 100 типовых изолятов, которые были идентифицированы как 26 видов микроскопических грибов. Отдел Mucoromycota представлен только 2 видами *Mucor hiemalis, Mucor strictus.* Отдел Basidiomycota насчитывает 3 вида *Goffeauzyma gilvescens, Cystobasidium ongulense Naganishia liqufaciens* Основное место в микобиоте древесных субстратов занимали представители Ascomycota (21 вид). Микромицеты *Pseudogymnoascus pannorum и Thelebolus microspores* были отмечены на плавнике южной и северной части архипелага Новая Земля. Микромицеты рода *Mucor* отмечались преимущественно в южной части архипелага.

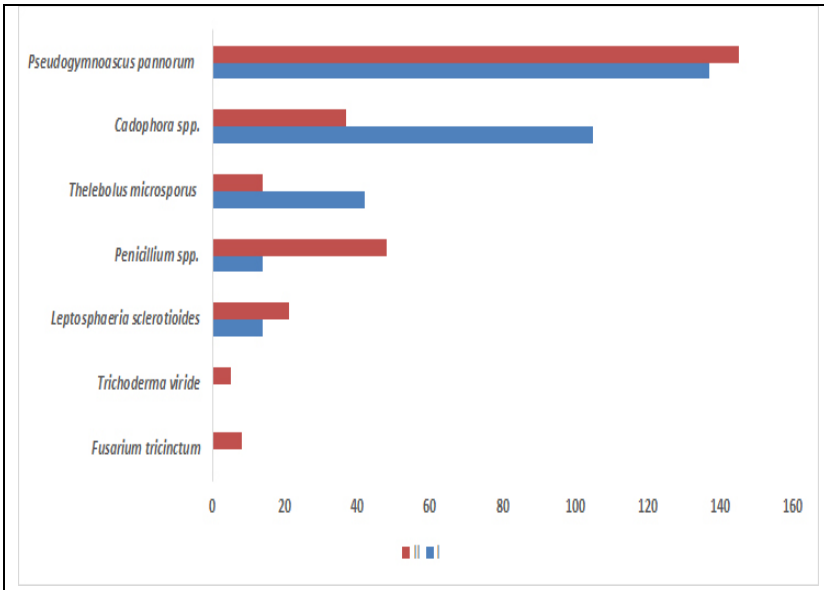


Рис.9 График рангового распределения микроскопических грибов в изученных образцах древесины выделенных с древесины-плавника: (I) Северные острова 2 – южные острова

Виды *Fusarium tricinctum* и *Neonectria candida* (ранее относившейся к роду *Fusarium*) также были отмечены в южной части архипелага Подобная тенденция отмечена и для видов рода *Penicillium.* Так из 6 видов данного рода, отмеченных на древесине плавника в районе архипелага Новая Земля только 2 вида отмечено в его северной части. Вид *Trichoderma viride,* также отмечен на южных островах.

Качественные тесты на лигнинолитический, целлюлолитический и амилолитический ферменты показали, что лигнинолитическими ферментами обладали 34% исследованных штаммов, амилолитической активностью обладали 57% изолятов, целлюлазолитический активность обладали 92 % исследованных изолятов. Наибольшую целлюлазолитическую активностью показал *Naganishia liquefaciens* ID-424.

Из 26 исследованных изолятов только 1 изолят (*Cystobasidium ongulense*) показал полное отсутствие способностей к разложению лингина, целлюлозы и крахмала, 7 изолятов (26 %) показали положительную реакцию во всех трех тестах. Эти изоляты относились к *Cadophora fastigiata* ID 369, *Cadophora luteo-olivacea* ID 376, *Epicoccum nigrum* ID 434, *Leptosphaeria sclerotioides* ID 433, *Penicillium aurantiogriseum* ID 408 , *Phoma herbarum* ID **430,** *Trichoderma viride* ID 363. Кроме того, все изоляты в наших исследованиях относились к психротрофным формам , т.е. были способны активно расти при температуре +5^{o} C, а также при содержании 5% - NaCl в среде.

Эти данные могут способствовать оценке распространения грибов биодеструкторов в арктике и найти применение при изучении закономерностей их распространения в природе и антропогенных местообитаниях. В перспективе это позволит получить дополнительную информацию об особенностях деградации древесины этими грибами и разработать меры по сохранению материалов древесины.

Глава 5 Исследование микроскопических грибов на древесине плавника и антропогенно привнесенной древесине острова Визе и островов архипелага Северная Земля. С древесины плавника было выделено и идентифицировано 48 видов. Наибольшим числом изолятов были представлены виды *Cadophora malorum, Heydenia alpine, Paraphoma fimeti, Thelebolus microspores.* Качественные тесты показали, что лигнинолитическими ферментами обладали 25% исследованных штаммов, амилолитической и целлюлазолитический активность обладали 84 % исследованных изолятов. 3 изолята (25%) показали положительную реакцию во всех трех тестах, это изоляты видов *Cladosporium herbarum Cystobasidium ongulense Thelebolus microsporus*

Глава 6 Исследование микроскопических грибов на древесине плавника материковых территорий в районе пос. Тикси (море Лаптевых). С древесины плавника было выделено 73 культурально морфологических типа. Наибольшим числом изолятов

были представлены виды родов *Cadophora, Cladosporium* и дрожжевые формы микроскопических грибов, включая виды рода *Candida.* Только на древесине плавника на материковой суше отмечены микромицеты рода *Aspergillus*

Глава 7. Исследование микроскопических грибов на древесине плавника материковых территорий в районе пос. Териберка (Баренцево море).

С древесины плавника было выделено и идентифицировано 37 видов. Наибольшим числом изолятов были представлены виды родов *Penicillium Fusarium Trichoderma.* Отмечено что в процессе деструкции древесины снижалось видовое разнообразие микроскопических грибов на древесине плавника.. Качественные тесты показали, что лигнинолитическими ферментами обладали 33% исследованных штаммов, амилолитической 93% и целлюлазолитический активность обладали 90 % исследованных изолятов.

Глава 8. Таксономический состав комплексов микромицетов на древесине плавника и антропогенно привнесенной древесине. Сравнение комплексов микроскопических грибов на древесине плавника разных природных зон.

Всего из древесины плавника и антропогенно привнесенной древесины было выделено культуры 100 видов грибов. Эти виды относились к 3 отделам Mucoromycota Basidiomycota, Ascomycota. К Mucoromycota относилось 9 видов родов *Mucor Rhizopus Pirella.* К Basidiomycota – 12 видов 10 родов, как правило представленных дрожжевыми формама. Большая часть видов относиться к Ascomycota - 79 видов. Из них с образцов антропогенно привнесенной древесины было выделено 45 видов. С древесины плавника было выделено 87 видов.

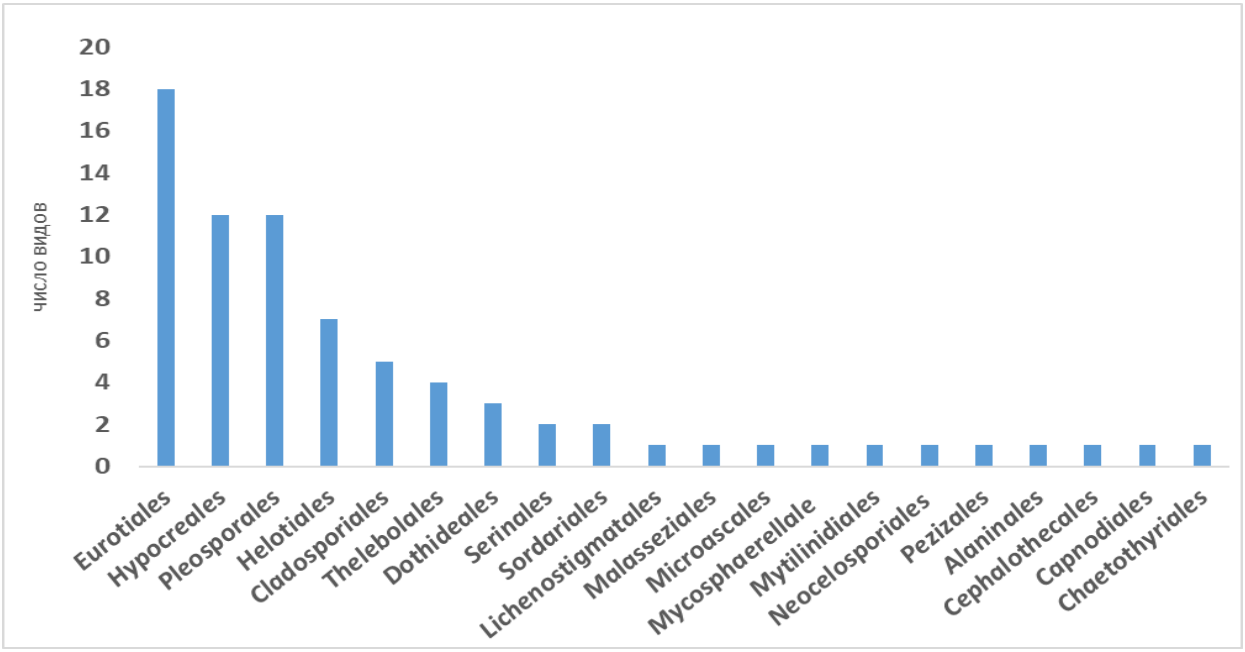


Рис.10 Распределение видов Ascomycota по порядкам

Выделенные микроскопические грибы относились к 61 родам. Наибольшее число видов принадлежало роду *Penicillium* (15 видов). Следующими по числу видов следовали роды *Cadophora и Cladosporium* по 5 видов, род *Fusarium* насчитывал 4 вида , а род Theleobolus – 3 вида. Остальные роды были представлены 1-2 видами.

Выделенные микроскопические грибы относились к 44 семействам и 30 порядков Наибольшее число видов принадлежалок к порядкам *Eurotiales* -18 видов, *Hypocreales* и *Pleosporales* насчитывали по 12 видов

Древесина плавника арктических территорий характеризуются относительно низким видовым разнообразием микроскопических грибов, что возможно связано с микобиотой данного региона на основании которой в основном и формируются сообщества микромицетов на древесине плавника. Практически во всех комплексах микромицетов присутствовали представители рода *Penicillium*, однако если в микобиоте ЗФИ они составляли только 4% всех выделенных изолятов, то в микобиоте Новой земли их доля увеличивалась до 16%, а на побережье Баренцевого моря до 38%. Доля микромицетов рода *Cadophora* последовательно снижалась от 11-13% в микобиоте островов до 2% в материковой зоне. Аналогично, от 16 до 4% снижалась доля рода *Thelebolus.* Доля микромицетов рода *Pseudogymnoascus* не значительно снижалась от 14-16% в микобиоте плавника островов до 13% в микобиоте материковой зоне. (Рис.11).

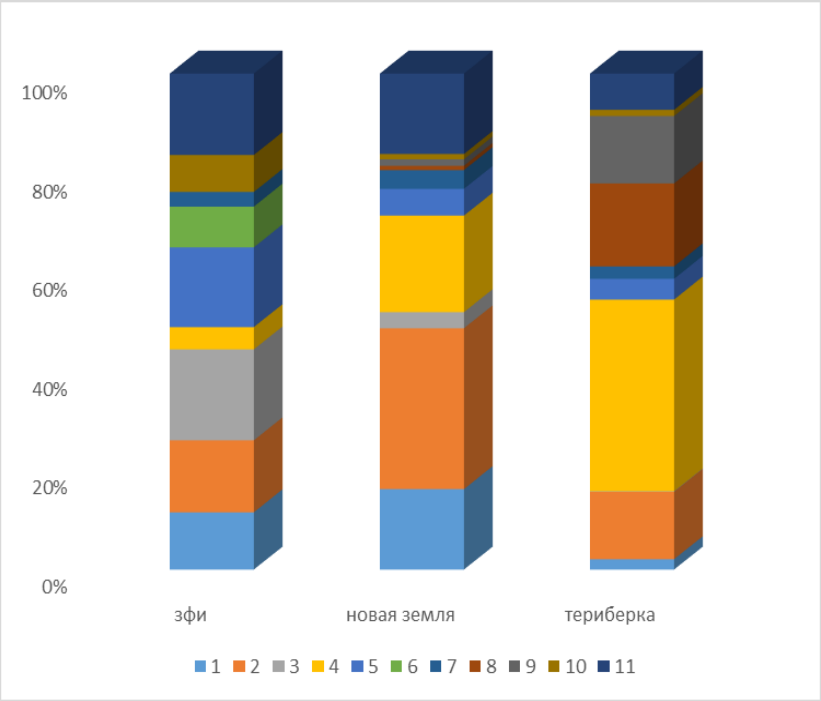


Рис.11. Изменение микобиоты плавника от островных территорий к материковой зоне в Российской Арктике. *1-Cadophora* spp., 2- *Pseudogymnoascus* spp., 3-*Goffeauzyma* spp. 4-*Penicillium* spp., 5-*Thelebolus spp., 6- Xenopolyscytalum* spp., 7- *Leptosphaeria* spp., 8- *Fusarium* spp., 9- *Trichoderma* spp., 10- *Cladosporium* spp., 11- все остальные

Напротив, хотя микромицеты родов *Fusarium* и *Trichoderma* были отмечены только единичными находками на плавнике в район южных островов архипелага Новая Земля и не отмечались на более Северных территориях, они составляли 17 и 13% соответсвенно на плавнике материкового побережья Баренцевого моря (район Териберки).

Таким образом отмечены изменения в структуре комплексов микроскопических грибов от зоны полярных пустынь к тундровой зоне. В частности, отмечено увеличение доли изолятов и видового разнообразия микромицетов рода *Penicillium, Trichoderma Fusarium* и снижение доли дрожжевых форм микроскопических грибов и родов, *Cadophora, Thelebolus, Goffeauzyma* и других родов имеющих форму дрожжей.

Глава 9 Новые для науки виды выделенные в процессе исследования древесины Арктики. Новый вид *Cadophora arctica,* Iliushin, Kirts. & Pankova.

Описан новый вид *Cadophora arctica,* Iliushin, Kirts. & Pankova был выделен с древесины плавника отобранной на мысе Гранта (о. Земля Георга, архипелаг Земля Франца-Иосифа) (рис.12) Была построена комбинированная матрица данных ITS+LSU+BenA+TEF1, содержащая 61 изолят, принадлежащий к 41 виду. Данные о последовательностях из ITS, LSU, BenA и TEF1 были проанализированы для изучения филогении *C. arctica*. Данные по 61 изоляту, включая внешнюю группу (hymenoscyphus tetracladius DSM 104345), были использованы для выявления филогенетических связей предполагаемого нового вида с другими видами рода *Cadophora*. Регион ITS (454 сайтов/136 переменных), частичный ген 28S рДНК (LSU) (582 сайта/96 переменных), частичный BenA (292 сайта/196 переменных) и последовательности TEF1 (184 сайта/115 переменных) были объединены.

При изучении макроморфологии было отмечено, что вид *C. arctica* имеет некоторые общие морфологические характеристики с другими ближайшими представителями рода *Cadophora*, такими как, *C. rotunda, C. caespitosa, C. fastigiata* и *C. melinii.* Колонии *C. arctica* имеют насыщенный черно-коричневый цвет. При изучении микроморфологии было отмечено, что длина конидиеносцев вида *C. arctica*, в среднем составляет 15,8 мкм, Морфология фиалид *C. arctica* сходна с морфологией *C. caespitosa,* Конидии *C. arctica* и *C. fastigiata* имеют сходную морфологию и варьируются от яйцевидной до эллипсоидной форм. Размер конидий у всех близкородственных видов примерно одинаковый и находится в пределах 3,0–7,0 × 2,0–3,5 мкм.

Рисунок12 *Cadophora arctica* 1-3 микромофология, 4- макроморфология

Новый вид *Dothidea nigricans*. Iliushin, Kirts. & Pankova.

Новый вид рода Dothidea был выделен с Земли Франца-Иосифа, Россия, и представлен штаммом бывшего типа VKM F-5012. Для характеристики вида мы использовали полифазный таксономический подход. Дано описание, основанное на морфологических признаках, и показано, что новый вид морфологически отличается от близкородственных видов (D. muelleri, D. kunmingensis и D. insculpta). Также были проанализированы частичные последовательности внутреннего транскрибируемого спейсерного региона рДНК (ITS1-5.8S-ITS2), региона D1/D2 28S рДНК (LSU) и частичной второй по величине субъединицы рибосомальной полимеразы II (RPB2). Данные о последовательностях, макро- и микроморфологические характеристики отличают D. nigricans от всех известных видов рода Dothidea. D. nigricans, выделенный из образцов древесины заброшенных зданий полярной станции, способен расти при температуре 6°C и считается психротолерантным видом. Кроме того, D. nigricans является первым видом рода Dotidea, который демонстрирует анаморфную стадию при культивировании.

Для исследуемого изолята нами были проанализированы данные о последовательностях LSU, ITS и RPB2. Всего было проанализировано данных по 33 изолятам, включая внешнюю группу (*Phaeocryptopus nudus* (Peck) Petr. CBS 268.37), Согласно этому анализу, *D. nigricans* объединены в группу вместе с *D. insculpta, D. kunmingensis* Ying Gao, Gentekaki & Monkai и *D. muelleri* Loeffler как наиболее близкородственные виды.

Колонии на питательной среде MEA через 21 день при температуре 21°C достигли диаметра 14-18 мм, имели морщинистую кожистую поверхность, без воздушного мицелия. Цвет колонии варьировался от коричневато-черного до оливково-черного; экссудат отсутствует. Дрожжеподобные колонии на питательной среде CZA через 21 день при температуре 21°C достигли диаметра 11-15 мм, имели гладкую и слизистую поверхность. Колонии имели свето-желтый цвет, экссудат отсутствовал. Чем ниже температура

культивирования, тем позже начинают темнеть колонии. Диапазон температур роста: 6-27 °C. Оптимальная температура: 21-23 °C.

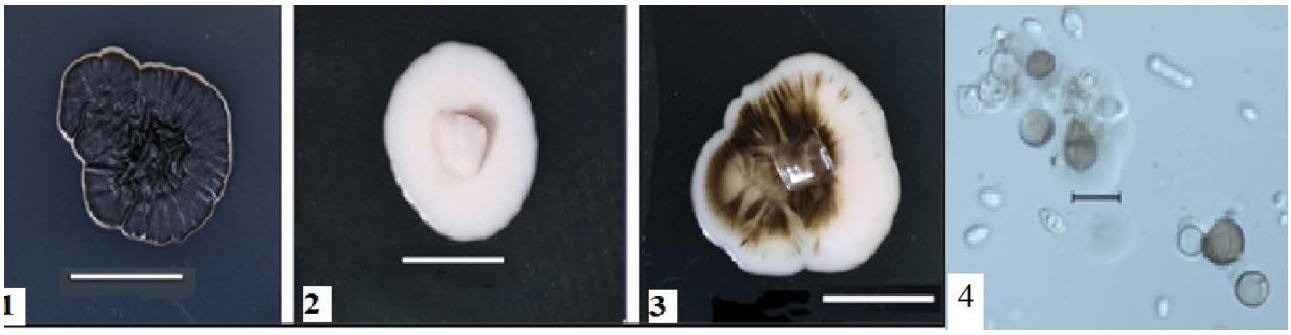


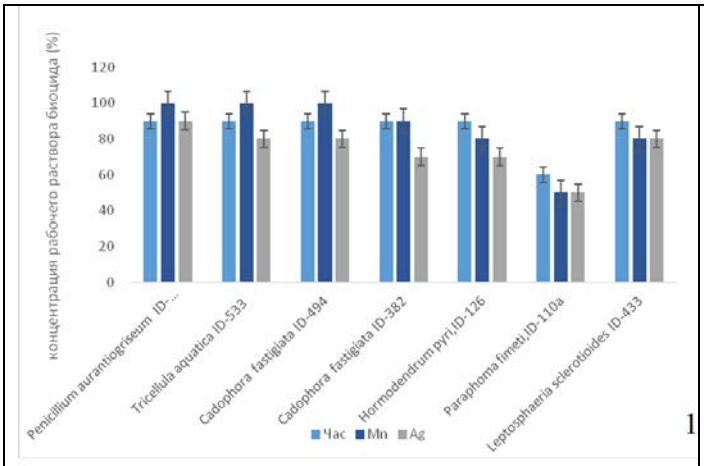
Рисунок 13. *Dothidea nigricans* 1-3 Макроморфология; 4 микроморфология.

Конидии часто дрожжеподобные, гиалиновые, с гладкими стенками, асептидные, эллипсоидальной или субшаровидной или лимонной формы, размером 3,5-7,0 × 1,5-4,0 мкм. (рис. 13).

Глава 10 Изучение биоцидного действие новых защитных составов в отношении микроскопических грибов выделенных с древесины Арктики.

Изучено биоцидное действие новых защитных составов на основе нанносеребра (Ag*); - бромистого тетрабутиламмоний (ЧАС*); - карбоксилат Mn (Mn*); - поликристаллических *моно*- (MnL1), *бис*-(MnL2), и *трис*-хелатных(MnL3) 1,10-фенантролиновых ацетатных комплексов Mn(II) в отношении микроскопических грибов: *Cadophora fastigiata* ID-382, ID-494, *Hormodendrum pyri* ID-126, *Leptosphaeria sclerotioides* ID-433, *Paraphoma fimeti* ID-110a, *Penicillium aurantiogriseum* ID-408, *Thelebolus microspores* ID-423, *Tricellula aquatic* ID-533, изолированных с древесины арктических регионов России.

Для трёх соединений (MnL1, MnL2 и MnL3) обнаружено сильное фунгистатическое и фунгицидное действие. Полученные результаты показывают перспективность поиска среди карбоксилатных комплексов марганца(II) с координированным 1,10-фенантролином эффективных экологичных биоцидов для защиты древесины от биоразрушения в условиях арктических регионов России. (рис.13,14)



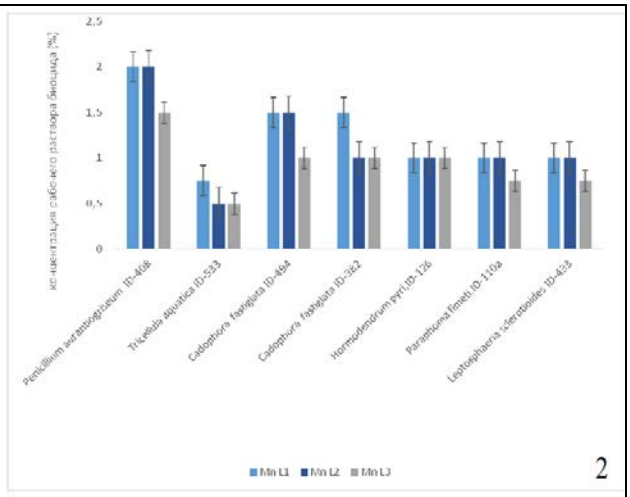
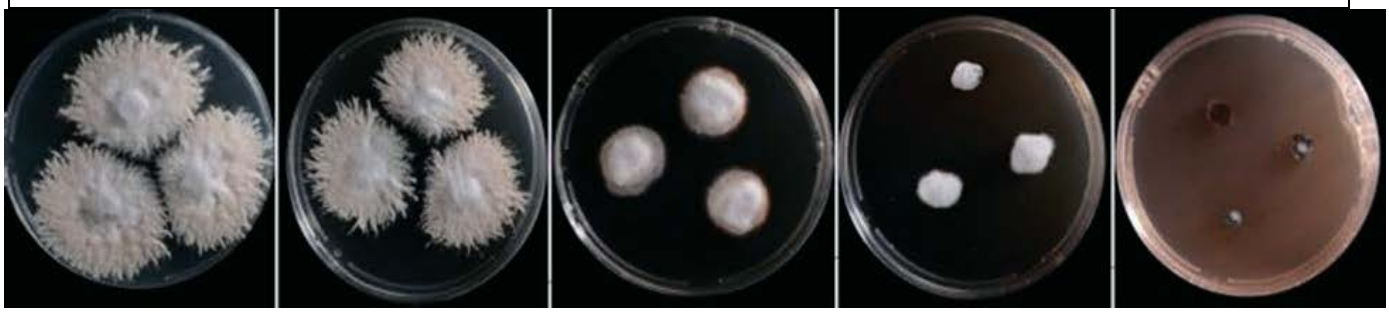


Рис. 13 Минимальная ингибирующая концентрация биоцидов 1)Ag, ЧАС и Mn 2) Mn L1, Mn l2, Mn L3 полученных методом метод микроразведения.



Контроль	0,1 %	0,5 %	1,0 %	2,0 %

Рис. 14. Влияние биоцидного состава MnL1 на рост и развитие колоний гриба *Leptosphaeria sclerotioides* ID-433 на питательной среде Сабуро

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования было изучено биоразнообразие микроскопических грибов на древесине плавника и антропогенно привнесенной древесине на островах архипелага ЗФИ, Новая Земля, Северная Земля, о. Визе и на материковых территориях в районах пос. Тикси (море Лаптевых) и пос. Териберка (Баренцево море).

На древесине плавника и антропогенно привнесенной древесине наблюдалась бедность видового состава. На образцах древесины плавника было изолировано 87 видов микроскопических грибов. На антропогенно привнесенной древесине 45 видов. Всего, в ходе исследования было выделено 100 видов микроскопических грибов. Два из них, *Dothidea* sp. *(nigricans)* и *Cadophora arctica* оказались новыми для науки видами.

Впервые получены и проанализированы данные о микобиоте на древесине плавника, расположенных в различных природных зонах Арктики (полярные пустыни и тундровая зона). Показана зависимость видового разнообразия микроскопических грибов от

природных зонах Арктики. Проведены исследования адаптации микроскопических грибов к древесине в Арктике. Выявлены психрофильные микромицеты, грибы, обладающие комплексом лигнолитических и целлюлазолитических ферментов, которые могут быть использованы в низкотемпературных условиях.

ВЫВОДЫ

1) Древесина плавника, характеризуются относительно низким видовым разнообразием. В результате исследований было выделено 100 видов микроскопических грибов, 87 видов из древесины плавника и 45 антропогенно привнесенной древесины.

2) Определены видовой состав, и таксономическая структура комплексов микромицетов плавника и антропогенно привнесенной древесины. 61 вид был изолирован из древесины островов архипелага ЗФИ, 26 из плавника архипелага Новой Земли, 48 из древесины архипелага Северной земли и о. Визе, 37 из древесины плавника материкового побережья в районе пос. Териберка (Баренцево море).

3) Виды *Dothidea* sp. *(nigricans)* и *Cadophora arctica* выделенные в процессе исследования, являются новыми для науки видами.

4) Было проведено сравнение видового состава микроскопических грибов выделенных с древесины из различных природных зон Арктики. Показано изменение в структуре комплексов микроскопических грибов от зоны полярных пустынь к тундровой зоне. В частности, отмечено увеличение доли изолятов и видового разнообразия микромицетов рода *Penicillium, Trichoderma Fusarium* и снижение доли дрожжевых форм микроскопических грибов.

5) В результате проведенных исследований выявлены микромицеты, обладающих оксидазными комплексом ферментов, потенциально способных к биодеградации лигнина, а также микромицеты, обладающих целлюлозолитическими ферментами. Показана, что при формировании комплексы микромицетов на древесине плавника происходит отбор и накопление видов способных к разложению древесины в условиях низких температур. Отмечены штаммовые различия между различными изолятами одного вида, что может свидетельствовать о генетической разнородности популяций и/или различном их происхождении.

6) Выделение культур базидиальных, древоразрушающих грибов из древесины плавника в высоких широтах Арктики свидетельствует о возможности распространения пропагул грибов водным путем и сохранение жизнеспособности базидиальных видов в процессе сплава плавника от таежных местообитаний, до островов Северного Ледовитого океана. Это может приводить к накоплению инфекционного материала дереворазрушающих грибов в условиях высоких широт. Развитию базидиальных грибов в условиях Арктики препятствуют

в первую очередь низкие температуры, однако с повышением температур в Арктики возможно изменение в структуре комплексов дереворазрушающих грибов.

7) Для трёх из исследованных соединений биоцидов (MnL1, MnL2 и MnL3) обнаружено сильное фунгистатическое и фунгицидное действие, что показывает перспективность поиска среди карбоксилатных комплексов марганца (II) эффективных экологичных биоцидов для защиты древесины от биоразрушения в условиях арктических регионов России.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Панькова И.Г.,** Кирцидели И.Ю., Ильюшин В.А., Зеленская М.С. , Власов Д.Ю. Гаврило М.В., Баранцевиц Е.П. Разнообразие микроскопических грибов и их свойства биодеструкторов на антропогенно привнесенной древесине и плавнике на о. Хейса (архипелаг ЗФИ). Микология и Фитопатология. 2023. 57(3): 184–197 https://doi.org/10.31857/S002636482301004X
2. Iliushin V.A., Kirtsideli I.Yu. **Pankova I.G.** *Cadophora arctica* (Ploettnerulaceae, Helotiales), a new species from Franz Josef Land. *Phytotaxa*. 2024. 669(1): 1–12. https://doi.org/10.11646/phytotaxa.669.1.1
3. Demidov V. N., Tsvetkova I. N., Pakhomova T. B., Sokolov A. E., **Pankova I. G**., Kirtsideli I. Yu., Iliushin V. A., and Vlasov D. Yu. Synthesis, Characteristics, and Biocidal Effect of New Protective Compositions Based on Complexes of Mn(II) with 1,10-Phenanthroline in Relation to Microscopic Fungi Isolated from Wood of the Arctic Regions of Russia// Glass Physics and Chemistry. 2025. 51(2): 143–154. doi: 10.1134/S1087659624601205
4. **Pankova I.G.,** Kirtsideli I.Yu., Iliushin V.A., Gavrilo M.V., Goncharov A.E., Vlasov D.Yu. Species diversity and enzymatic activity of microfungi isolated from driftwood at the Novaya Zemlya archipelago. Микология и Фитопатология. 2025. 59(6): (в печати)
5. Iliushin V.A., Kirtsideli I.Yu. **Pankova I.G.** *Dothidea nigricans* (Dothideaceae, Dothideales), a new species from the timber of the polar station on Franz Josef Land. Sydowia 2025. (в печати)
6. Kirtsideli I.Y., **Pankova I.G.,** Iliushin V.A., Korablev A.P., Gavrilo M.V. Zelenskaya M.S. and Vlasov D.Y. Diversity of Microfungi on Drift Wood and Anthropogenically Introduced Wood on Franz Josef Land Archipelago. JOF(в печати)

Материалы и тезисы конференций, сборники.

1. Панькова И.Г., Кирцидели И.Ю., Ильюшин В.А., Власов Д.Ю. Антропогенно привнесенная древсина острова Визе как возможный источник потенциальных патогенных грибов // Современная микология в России. Материалы Мемориальной микологической конференции. М: Национальная академия микологии. 2025. 11: 70.

2. Панькова И.Г., Николаев Н.С., Кирцидели И.Ю., Ильюшин В.А., Власов Д.Ю. Экстремальные природные местообитания как естественные источники условно-патогенных культивируемых видов грибов // Проблемы медицинской микологии. 2025. 27(2): 223.

3. Панькова И.Г., Кирцидели И.Ю., Ильюшин В.А. Микроскопические грибы на древесных субстратах прибрежных арктических территорий России // Сборник материалов VI (XIV) Международной ботанической конференции молодых ученых в Санкт-Петербурге. СПб: БИН РАН, 2025.

4. Панькова И. Г., Кирцидели И. Ю., Ильюшин В. А., Власов Д. Ю. Изучение свойств новых малотоксичных биоцидов на арктические микроскопические гриб // Проблемы медицинской микологии. 2024. 26(2): 182

5. Панин А.Л., Лунев П.И., Краева Л.А., Кирцидели И.Ю., Рябушева У.Д., Панькова И.Г., Власов Д.Ю. Микробные сообщества Арктического побережья в условиях изменения климата // Проблемы медицинской микологии. 2024. 26(2): 181.

6. Панькова И.Г., Кирцидели И.Ю., Ильюшин В.А., Власов Д.Ю., Зеленская М.С. Микроскопические грибы на антропогенно привнесенных целлюлозосодержащих материалах в арктическом регионе как источник условно-патогенных видов // Проблемы медицинской микологии. 2023. 25(2): 156.

7. Кирцидели И.Ю., Панькова И.Г. , Ильюшин В.А. , Власов Д.Ю. , Зеленская М.С., Гаврило М.В. Микроскопические грибы древесных субстратов (о. Хейса, архипелаг Земля Франца - Иосифа) // Проблемы медицинской микологии. 2022. 24(2): 115.

8. Панькова И. Г., Кирцидели И. Ю., Ильюшин В. А., Зеленская М. С., Власов Д. Ю. Микроскопические грибы на древесных субстратах (антропогенно привнесенной древесине и плавнике) в Арктических морях // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук. Ярославль. 2023:43.

9. Панькова И.Г. Микроскопические грибы древесных субстратов Арктики (на примере о.Хейса, архипелаг Земля Франца-Иосифа // Сборник материалов V (XII) Международной ботанической конференции молодых ученых в Санкт-Петербурге. СПб.: БИН РАН, 2022.

10. Панькова И. Г., Кирцидели И. Ю., Ильюшин В. А. Биоразнообразие и ферментативная активность микроскопических грибов на древесине плавнике в арктических морях // Материалы VIII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 300-летию Российской академии наук и 35-летию Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Апатиты, 24–29 июня 2024 г. /— Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН 2024.

11. Панькова И.Г., Кирцидели И.Ю., Ильюшин В.А., Власов Д.Ю., Гаврило М.В. Микроскопические грибы древесных субстратов Арктики (архипелаг Земля Франца-Иосифа) // Современная микология в России.. Материалы 5-го Съезда микологов России. М.: Национальная академия микологии. 2022. 9: 21.

12. Панькова И.Г., Кирцидели И.Ю., Ильюшин В.А., Гаврило М.В. Развитие микроскопических грибов на древесине плавника в районе архипелага Северная Земля в Карском море // Океанологические исследования: материалы X конференции молодых ученых, 24 – 28 апреля 2023 г., Владивосток, Россия. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН. 2023:168.

Список литературы

1. Blanchette, R.A.; Held, B.W.; Arenz, B.E.; et al. An Antarctic hot spot for fungi at Shackleton's historic hut on Cape J. Royds. Microb. Ecol. 2010, 60, 29–38. https://doi.org/10.1007/s00248-010-9664-z
2. Blanchette R., Held B., Hellman L., Millman L., Büntgen U. Arctic driftwood reveals unexpectedly rich fungal diversity. Fungal Ecology. 2016. V. 23. P.58-63. https://doi.org/10.1016/j.funeco.2016.06.001
3. Godinho, T. de O. et al. Biomassa, macronutrientes e carbono Orgânico na serapilheira depositada em trecho de floresta Estacional Semidecidual Submontana, ES. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 131-144, 2013.
4. Jurgens JA, Blanchette RA, Filley TR (2009) Fungal diversity and deterioration in mummified woods from the ad Astra Ice Capregion in the Canadian High Arctic. Polar Biol 32:751–758
5. Iliushin, V.; Kirtsideli, I.Y.; Pankova, I. G. Cadophora arctica (Ploettnerulaceae, Helotiales), a new species from Franz Josef Land. J. Phytotaxa. 2024, 669. 1-12. https://doi.org 10.11646/phytotaxa.669.1.1
6. Shepelev A.G., Fedorov A., Kizyakov A., Wetterich S., Cherepanova A., Syromyatnikov I., Savvinov G. Sub-Surface carbon stocks in Northern Taiga Landsapes exposed in tha Batagay Megaslump Yana Upland, Yakutia. Land 2020, 9(9), 305; https://doi.org/10.3390/land9090305
7. Stchigel AM, Guarro J, Mac Cormack W (2003) Apiosordaria antarctica and Thielavia antarctica, two new ascomycetes from Antarctica. Mycologia 95:1218–1226
8. Timling, I.; Taylor, D. L. Peeking through a frosty window: molecular insights into the ecology of Arctic soil fungi. J. Fungal Ecology. 2012, 5, 419-429. https://doi.org/10.1016/j.funeco.2012.01.009.
9. Tosi, S.; Casado, B.; Gerdol, R.; Caretta G. Fungi isolated from Antarctic mosses. J. Polar Biol. 2002, 25, 262–268. https://doi.org/10.1007/s00300-001-0337-8
10. Tosi S., Casado B., Gerdol R., Caretta G. Fungi isolated from Antarctic mosses. Polar Biol. 2002. V. 25. P. 262–268. https://doi.org/10.1007/s00300-001-0337-8
11. Vlasov D. Yu., Teshebaev Sh. B., Zelenskaya M. S., Kirtsideli I. Yu., Ryabusheva Yu. V. Mycological damage to indoor materials as a risk factor for the health of polar explorers. J. Hygiene and sanitation. 2019, 98, 17–21. https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-17-21
12. Vlasov D. Yu., Kirtsideli I. Yu., Novozhilov Yu. K., Abakumov E. V., Barantsevich E. P., Zelenskaya M. S. Anthropogenic Invasion of Micromycetes to Undisturbed Ecosystems of the Larsemann Hills Oasis (East Antarctica). J. Russian Journal of Biological Invasions. 2020, 11, 208–215. https://10.1134/S2075111720030121
13. Zhdanova N.N. Zakharchenko V.A., Vasilevskaya A.I., Shkolny A.T., Kuchma N.D., Artyshkova L.V., Sadovnikov Yu.S., Vember V.V., Nakonechnaya L.T., Kupchenko I.N., Sokolova E.V., Orlov A.A., Redchits T.I., Zheltonozhsky V.A., Sadovnikov L.V., Lashko T.N., Zheltonozhskaya M.V., Grodzinskaya A.A., Syrchin S.A., Wasser S.P., Karpenko Yu.V., Pavlichenko A.K., Olishevskaya S.V., Tugai T.I. Mycobiota of Ukrainian woodland, the consequences of the Chernobyl disaster. Naukova Dumka: Kyiv, 2013, p. 382. ISBN: 978-966-00-1329-2