

УДК 579.22+57.043

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ГРИБОВ В УСЛОВИЯХ СВЕРХСЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

© 2025 г. В. Д. Родимин^а, С. А. Харин^{а, *}, С. В. Поддубко^а, А. В. Кураков^б,
С. А. Кулачкова^б, М. М. Ярмеева^б, В. М. Лебедев^с, А. В. Спасский^с

^аГосударственный научный центр Российской Федерации Институт медико-биологических проблем РАН,
Москва, 123007, Россия

^бМГУ им. М.В. Ломоносова, биологический факультет, Москва, 119234, Россия

^сНИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ, Москва, 119991, Россия

*e-mail: charin@imbp.ru

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.

После исправления 25.09.2024 г.

Принята к опубликованию 27.09.2024 г.

В работе представлены результаты исследования влияния сверхслабых магнитных полей (МП) на жизнеспособность, характеристики роста, дыхательную активность и антагонистические свойства микроскопических грибов. Эксперименты проводили на штаммах, выделенных из внутреннего объема Международной космической станции. Для создания гипомагнитных условий (ГМУ) в экспериментах использовали гипомагнитные камеры ГМК-1 и ГМК-2, экранирующие МП Земли. Стенки камер являются двухсекционным магнитным экраном, изготовленным из аморфной пермаллоевой ленты. В экспериментах камеры ГМК позволили снизить геомагнитное поле в 1000–2000 раз. Максимальное значение МП после размагничивания не превышало 45 нТл. Установлено, что гипомагнитное поле (ГМП) преимущественно не оказывало ингибирующего и/или стимулирующего воздействия на жизнеспособность спор и рост колоний грибов, на что указывало отсутствие достоверных изменений в количественном уровне, проценте прорастания спор и радиальной скорости роста тестируемых штаммов в ГМУ по сравнению с геомагнитными условиями. В то же время интенсивность роста и дыхания в ряде случаев заметно стимулировалась в ГМП при развитии микромицетов на поверхности образцов конструкционных материалов в условиях ограниченной доступности питательных элементов. Также обнаружено, что ГМП оказывает влияние на антагонистические свойства некоторых микроскопических грибов. Выращенный в ГМУ штамм *Penicillium rugulosum* 633.12 полностью терял свою антагонистическую активность по отношению к бактериям, выявленную у него на высоком уровне при культивировании в стандартных геомагнитных условиях. Полученные результаты обсуждаются в контексте особенностей микробной колонизации среды обитания будущих лунных комплексов.

Ключевые слова: микроскопические грибы, гипомагнитное поле, гипомагнитные условия Луны, среда обитания космических комплексов, конструкционные материалы

DOI: 10.31857/S0026365625020031

В процессе эволюции магнитные поля (МП) превратились в важную информационную систему и обязательный компонент жизни. Действие МП различной интенсивности является экологически значимым фактором внешней среды, влияющим на многие биологические процессы (Volpe, 2003).

Исследования по изучению влияния МП на микроорганизмы, в том числе микромицеты, проводятся в мире достаточно долгое время (Moore, 1979; Pazur et al., 2007). Большинство этих работ были направлены на изучение разнообразных биологических реакций микроорганизмов в ответ на воздействие МП различной интенсивности

и частоты. У микроскопических грибов в основном изучались показатели роста, спорообразование, метаболическая и ферментативная активность, а также изменения в антагонизме по отношению к другим видам (Albertini et al., 2003; Nagy et al., 2004; Pazur et al., 2007; Макаров и соавт., 2019). Результаты этих исследований показывают, что воздействие МП на микромицеты способно вызывать разнонаправленные биологические эффекты, характер которых определяется интенсивностью, частотой и длительностью воздействия МП. Разным группам исследователей удавалось обнаружить как ингибирующее, так и стимулирующее влияние МП

на тот или иной биологический процесс или свойство грибов (Albertini et al., 2003; Nagy et al., 2004; Касатова и соавт., 2017; Макаров и соавт., 2019). Также зачастую наблюдалось отсутствие эффекта (Ruiz-Gomez et al., 2004; Pazur et al., 2007).

Необходимо отметить, что в подавляющем большинстве работ, посвященных изучению магнитобиологических эффектов у микроскопических грибов, исследовалось влияние МП, сопоставимых по своим величинам с геомагнитным полем, либо превышающем его на порядки. Величины МП в этих исследованиях варьировали от нескольких мТл до нескольких Тл (Pazur et al., 2007). В то же время в магнитобиологии существует ощутимый пробел в информации по влиянию сверхслабых МП на микроорганизмы (Erdmann et al., 2021; Sinčák et al., 2023). Изучению того, что происходит с микромицетами в условиях экранированного геомагнитного поля, посвящено лишь несколько работ в мире (Быстрова и соавт., 2009; Панина и соавт., 2012; Panina et al., 2019).

Как известно, эволюционное развитие микроорганизмов на протяжении сотен миллионов лет осуществлялось в условиях постоянного воздействия геомагнитного поля, что по идее должно было бы привести к появлению у различных видов разнообразных адаптаций к этому фактору и внутриклеточных механизмов взаимодействия с ним. Тем не менее роль геомагнитного поля как фактора естественной среды обитания и эволюции жизни на Земле остается не ясной (Erdmann et al., 2021). Также достоверно неизвестны и пути, по которым сигнал МП трансформируется в отклик биологической системы (Binhi et al., 2017).

Вместе с тем изучение этих вопросов имеет не только естественно-научный интерес, но и практическую значимость и, прежде всего, это затрагивает область пилотируемой космонавтики и освоения Луны человеком. После успешной реализации таких проектов в освоении околоземного космоса, как орбитальная станция “Мир” и Международная космическая станция (МКС), космонавтика постепенно переходит к новому этапу развития, стремясь расширить присутствие человека в космосе до границ Луны и ее орбиты. Используя огромный опыт в освоении космоса и уникальный научно-технический потенциал, космическая отрасль в настоящее время направляет все усилия на создание обитаемых комплексов на поверхности и орбите Луны.

Уже сейчас можно констатировать, что формирование микробного сообщества в обитаемых отсеках будущих лунных комплексов будет также протекать в условиях специфической среды обитания, сформированной процессами жизнедеятельности космонавтов и функционированием технических средств, в том числе систем жизнеобеспечения. Температура, относительная влажность

воздуха и его химический состав в среде лунных комплексов будут мало отличаться от значений этих параметров на МКС и от комфортных условий на Земле. Так же как и на МКС, в локальных зонах внутреннего герметичного объема лунных модулей микроклиматические параметры будут колебаться в широких пределах, вплоть до выпадения конденсата атмосферной влаги, что, в свою очередь, вероятно, будет провоцировать активное развитие грибов в этих локусах.

В то же время отличительной особенностью Луны является ее гипوماгнитное поле (ГМП), меняющееся в зависимости от ее районов в диапазоне от 0.1 до нескольких нТл, что в тысячи раз меньше МП Земли (Легостаев и соавт., 2011). При этом очевидно, что гипوماгнитные условия (ГМУ) Луны будут воздействовать не только на человека, но и на все живые объекты, находящиеся в среде обитания лунных комплексов, включая сообщество микроскопических грибов. По этой причине для достоверной оценки медицинских и технических рисков, связанных с развитием микроскопических грибов в среде обитания лунных комплексов, чрезвычайно важно понимать, какое влияние ГМУ оказывают на виды микроскопических грибов, наиболее часто встречающихся в микробном сообществе обитаемых космических комплексов.

Проведенное нами исследование было посвящено изучению влияния ГМУ на жизнеспособность, характеристики роста, дыхательную активность и антагонистические свойства микроскопических грибов для лучшего понимания особенностей формирования микробного сообщества среды обитания будущих лунных комплексов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования. Изучение влияния ГМП на микроскопические грибы проводили с использованием штаммов *Alternaria atra* 632.8, *Aspergillus sydowii* 626.5, *Penicillium chrysogenum* 633.8, *Penicillium* sp. 633.5, *Penicillium rugulosum* 633.12 и *Penicillium spinulosum* 633.7. Данные штаммы были выделены из микробиологических проб, отобранных с внутренних поверхностей Российского сегмента (РС) МКС в период работы 69-й экспедиции.

Видовую принадлежность грибных штаммов устанавливали на основе культурально-морфологических признаков по рекомендуемым для соответствующих таксонов грибов определителям, а также методом секвенирования рибосомальной РНК. Для секвенирования мицелий наращивали на жидкой питательной среде Чапека–Докса в течение 5 сут. ДНК из мицелия выделяли по стандартному протоколу с использованием лизирующего СТАВ-буфера (Belosokhov et al., 2022) и использовали в качестве

матрицы для амплификации ITS-региона. Амплификацию проводили на термоциклере Biorad T100 ("Bio Rad", США) и с праймерами ITS1/ITS4 ("Евроген", Россия) (White et al., 1990). Протокол амплификации включал первичную денатурацию при 95°C в течение 3 мин, затем 30 циклов при 94°C по 30 с, при 55°C по 30 с, при 72°C по 45 с и финальный этап при 72°C в течение 8 мин. Амплифицированные фрагменты разделяли в агарозном геле и очищали с помощью набора CleanUp Mini ("Евроген", Россия). Секвенирование проводили в компании "Евроген" по протоколу с набором реактивов BigDye ("ABI Prism", США) на автоматическом секвенаторе Applied Biosystems 3730 xl ("Applied Biosystems", США). Результаты анализировали в программе UGENE ("Unipro", Россия).

Гипомагнитные камеры. Для создания ГМУ в экспериментах с тест-культурами грибов использовали гипомагнитные камеры ГМК-1 и ГМК-2, экранирующие МП Земли. Данные установки представляют собой цилиндрические камеры из магнитомягкого материала с рабочим объемом 28 л. Стенки камер служат двухсекционным магнитным экраном, являющимся основой ГМК. Внутренняя экранирующая секция длиной 500 мм и диаметром 300 мм жестко закреплена внутри внешней экранирующей секции длиной 700 мм и диаметром 500 мм. Обе секции магнитного экрана изготовлены из аморфной пермаллой ленты. Аморфные ленты каждого экрана навиты в несколько слоев на соответствующие цилиндрические каркасы из стеклотекстолита. В промежутке между внутренней и внешней секциями экрана расположена однослойная размагничивающая катушка, выполненная из медного провода диаметром 1 мм. Магнитный экран снабжен двумя съемными крышками, обеспечивающими доступ внутрь экранируемого объема. В рабочем состоянии магнитного экрана обе крышки должны до упора закрывать соответствующие секции экрана. Внутри магнитного экрана располагается выносная подставка, обеспечивающая возможность размещать на ее поверхности изучаемые биологические объекты. При этом в ГМК-2, в отличие от ГМК-1, тест-культуры микромицетов экспонировали на термостатирующей платформе циркуляционного термостата LOIP LT-108, что давало возможность создавать оптимальную температуру для роста.

Камеры ГМК делают возможным снижение геомагнитного поля в 1000–2000 раз (Гудошников и соавт., 2012). Измерения ГМП в камерах проводились несколько раз магнитометром SENSYS FGM3D/125-C3T и регулярно в течение всего исследования магнитометром HVO-0599A. Максимальное значение МП в наших исследованиях после размагничивания не превышало 45 нТл.

Приготовление суспензий спор тест-культур грибов. Для приготовления суспензии спор грибов использовали тест-культуры, выращенные на среде

Чапека–Докса при 28°C в течение 10–14 сут. Суспензию спор в концентрации 10^5 – 10^6 кл./мл готовили отдельно для каждой тест-культуры. Для этого в пробирку, содержащую 5 мл стерильной дистиллированной воды, микробиологической петлей переносили споры грибов из чашки Петри с чистой культурой. При взятии спор из пробирки не касались петлей питательной среды.

Количество спор в суспензии определяли путем подсчета в счетной камере Горяева. Далее приготовленные суспензии проверяли на жизнеспособность спор. Для этого готовили серию разведений исходных суспензий, после чего из разведения с концентрацией спор 10^2 кл./мл переносили пипеткой аликвоту объемом 100 мкл на поверхность среды Чапека–Докса, разлитой в чашки Петри, и растирали ее шпателем по поверхности. Чашки с посевами инкубировали при 28°C в течение 5 сут, после чего производили осмотр. Если на питательной среде наблюдался рост грибов и количество колоний соответствовало концентрации суспензии, то споры грибов считали жизнеспособными.

Оценка влияния ГМУ на жизнеспособность и рост микроскопических грибов. Влияние ГМУ на жизнеспособность грибных штаммов оценивали по числу КОЕ, выросших при посеве споровых суспензий на агар Чапека–Докса, а также по проценту прорастания спор.

Аликвоту суспензий тест-культур объемом 100 мкл наносили автоматической пипеткой на поверхность среды Чапека–Докса и тщательно растирали шпателем по поверхности агара. Чашки экспонировали в ГМК-1 и в качестве контроля — в геомагнитных условиях. По истечении времени экспонирования производили подсчет выросших колоний. Об изменении жизнеспособности спор тест-культур судили путем сравнения числа КОЕ на контрольных и экспериментальных чашках. Для каждой тест-культуры проводили посев из суспензий 10^3 и 10^2 спор/мл по три чашки на разведение. После учета колоний рассчитывали среднее количество КОЕ и его стандартное отклонение.

В другом эксперименте жизнеспособность микромицетов оценивали по проценту прорастания спор. Для этого суспензии спор с концентрациями 10^5 – 10^6 кл./мл наносили на стекла для подсчета форменных элементов крови и экспонировали их в ГМК-1 и в геомагнитных условиях. После завершения экспонирования производили подсчет проросших спор и их общего количества. Процент прорастания вычисляли как долю проросших спор от их общего числа. Для каждой тест-культуры учитывали число всех и проросших спор в 9 больших квадратах камеры, находили средний процент прорастания и его стандартное отклонение.

Влияние ГМУ на рост грибных штаммов оценивали путем сравнения скорости роста колоний, выросших при экспонировании тест-культур в ГМК-1

и в условиях нормального МП Земли. Для этого автоматической пипеткой переносили каплю суспензии спор (10^3 кл./мл) объемом 10 мкл на поверхность среды Чапека—Докса в центр чашки Петри. Чашки экспонировали в ГМК-1 и в геомагнитных условиях. После завершения экспонирования измеряли диаметр выросших колоний тест-культур и определяли радиальную скорость роста. Оценку роста для каждой тест-культуры проводили по трем колониям, рассчитывая их средний диаметр и стандартное отклонение.

Во всех вышеперечисленных экспериментах тест-культуры экспонировали в течение 4, 6 и 9 сут в ГМК-1 при интенсивности МП, не превышающей 45 нТл, температуре 23–24°C и влажности 40–60%. Контрольные образцы находились рядом с ГМК-1 в условиях геомагнитного поля (36–38 мкТл) при аналогичной температуре, влажности и освещенности.

Оценка влияния ГМУ на антагонистические свойства микроскопических грибов. Исследование влияния ГМУ на антагонистические свойства микромицетов проводили методом агаровых блоков. Тест-организмами, по отношению к которым исследовался антагонизм грибов, являлись бактериальные штаммы *Bacillus licheniformis*, *B. pumilus*, *B. subtilis* и *Staphylococcus saprophyticus*. Данные штаммы были выделены из проб с поверхностей интерьера РС МКС и являются одними из наиболее распространенных видов бактерий в среде обитания МКС.

Суточные культуры бактерий суспендировали в стерильной дистиллированной воде до 0.5 единицы мутности по стандарту McFarland, что соответствовало 1.5×10^8 КОЕ/мл. Аликвоту суспензии объемом 100 мкл наносили на поверхность агара Мюллера—Хинтона и формировали равномерный газон, распределяя шпателем аликвоту по поверхности питательной среды в чашке Петри. По истечении нескольких минут, после впитывания суспензии, на поверхность накладывали агаровые блоки тест-культур грибов.

Для приготовления агаровых блоков тест-культуры грибов выращивали на среде Чапека—Докса в течение 9 сут при температуре 23–24°C в гипомагнитной установке ГМК-1 при МП не более 45 нТл и в качестве контрольного варианта — в стандартных геомагнитных условиях (36–38 мкТл). Затем стерильным пробочным сверлом (диаметр 5 мм) из слоя среды вырезали агаровые блоки и переносили их на поверхность агара Мюллера—Хинтона, только что засеянного тест-бактериями.

Посевы выдерживали в течение 1 ч при комнатной температуре для диффузии антимикробных веществ в агар, а затем помещали в термостат и инкубировали при температуре 37°C в течение 24 ч. Затем производили учет результатов путем измерения ширины зоны угнетения роста тест-культур

бактерий в мм вокруг агарового блока. Для каждой тест-культуры грибов опыт проводили в трехкратной повторности, рассчитывая среднюю ширину зоны угнетения и ее стандартное отклонение.

Оценка влияния ГМУ на рост и интенсивность дыхания микроскопических грибов на поверхностях конструкционных материалов. Влияние ГМУ на развитие грибов на поверхностях конструкционных материалов, используемых в космической технике, оценивали по уровню дыхательной активности тест-культур, нанесенных на образцы алюминия, резины и фторопласта.

Образцы материалов размером 2×2 см очищали от внешних загрязнений, протирая их поверхности бязевым тампоном, смоченным 96%-м этиловым спиртом. Заражение образцов, помещенных в чашки Петри, осуществляли нанесением на их поверхность маленьких капель (0.5–1 мм) суспензии тест-культур. Нанесение суспензии производили автоматической пипеткой равномерно по всей поверхности образца, не допуская слияния наносимых капель. Всего на один образец наносили 100 мкл суспензии спор с концентрацией 10^5 – 10^6 кл./мл. Зараженные образцы выдерживали в боксе при комнатной температуре до высыхания капель, но не более 60 мин. Для каждой тест-культуры и их смеси использовали трехкратную повторность по образцу материала.

Чашки Петри с зараженными образцами материалов помещали в ziplock пакеты. Для создания высокого уровня влажности в нижней части пакетов размещали увлажненные стерильным дистиллятом ватные тампоны. Пакеты с чашками экспонировали в течение 14 и 28 сут при температуре $29 \pm 1^\circ\text{C}$ в гипомагнитной камере ГМК-2 при МП, не превышающем 45 нТл, и в качестве контроля — в термостате в геомагнитном поле (36–38 мкТл).

По окончании экспонирования образцы материалов осматривали невооруженным глазом, а также в рассеянном свете при 50–60-кратном увеличении с помощью стереомикроскопа Stemi 2000 (“Carl Zeiss”, Германия). Рост микромицетов оценивали по интенсивности развития грибов на образцах по 6-балльной шкале согласно ГОСТ 9.048-89 (Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов) (табл. 1).

Другую часть образцов материалов после окончания 28 сут экспонирования помещали в пенициллиновые флаконы, которые герметично закрывали и инкубировали в течение 3 сут при температуре 28°C. Интенсивность дыхания тест-культур оценивали по продуцированию углекислого газа во флаконах. Количественный анализ содержания углекислого газа проводили на газовом хроматографе модели Кристаллюкс 4000М (НПФ “Метакром”, Россия) с детектором по теплопроводности.

Таблица 1. Баллы оценки роста грибов на поверхности образцов материалов

Балл	Характеристика балла
0	При осмотре под микроскопом рост плесневых грибов не виден
1	При осмотре под микроскопом видны проросшие споры и незначительно развитый мицелий в виде неветвящихся гиф
2	При осмотре под микроскопом виден мицелий в виде ветвящихся гиф и спороношение
3	При осмотре невооруженным глазом рост грибов едва виден, но отчетливо виден под микроскопом
4	При осмотре невооруженным глазом отчетливо виден рост грибов, покрывающих менее 25% испытываемой поверхности
5	При осмотре невооруженным глазом отчетливо виден рост грибов, покрывающих более 25% испытываемой поверхности

Длина колонок 3.2 м, наполнитель — Полисорб-1, газ-носитель — гелий, расход газа-носителя — 30 мл/мин. Температура колонок составляла 50°C, детектора — 60°C, испарителя — 60°C, ток измерительных элементов 100 мА, объем анализируемой пробы 0.5 см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние ГМП на жизнеспособность спор. Воздействие ГМП интенсивностью не более 45 нТл не оказывало существенного влияния на жизнеспособность грибных спор. Установлено, что при экспонировании посевов споровых суспензий тест-культур в ГМК-1 в течение 4, 6 и 9 сут в подавляющем большинстве случаев численность КОЕ грибов не изменялась по сравнению

с контрольными посевами, инкубировавшимися в условиях геомагнитного поля (рис. 1). Единственным исключением являлся штамм *A. sydowii* 626.5, численность жизнеспособных спор которого была в 3 раза больше при 9-суточном экспонировании в ГМУ, чем в геомагнитных условиях (рис. 1).

Жизнеспособность тест-культур не менялась также при экспонировании в ГМУ их споровых суспензий, нанесенных на стекла для подсчета форменных элементов. Процент прорастания спор для всех штаммов и сроков экспонирования не имел статистически значимых различий по сравнению с контрольными вариантами стекол, выдержанных в геомагнитных условиях (рис. 2).

Микроскопические грибы являются основным компонентом микробного сообщества среды обитания космических комплексов. Попадание

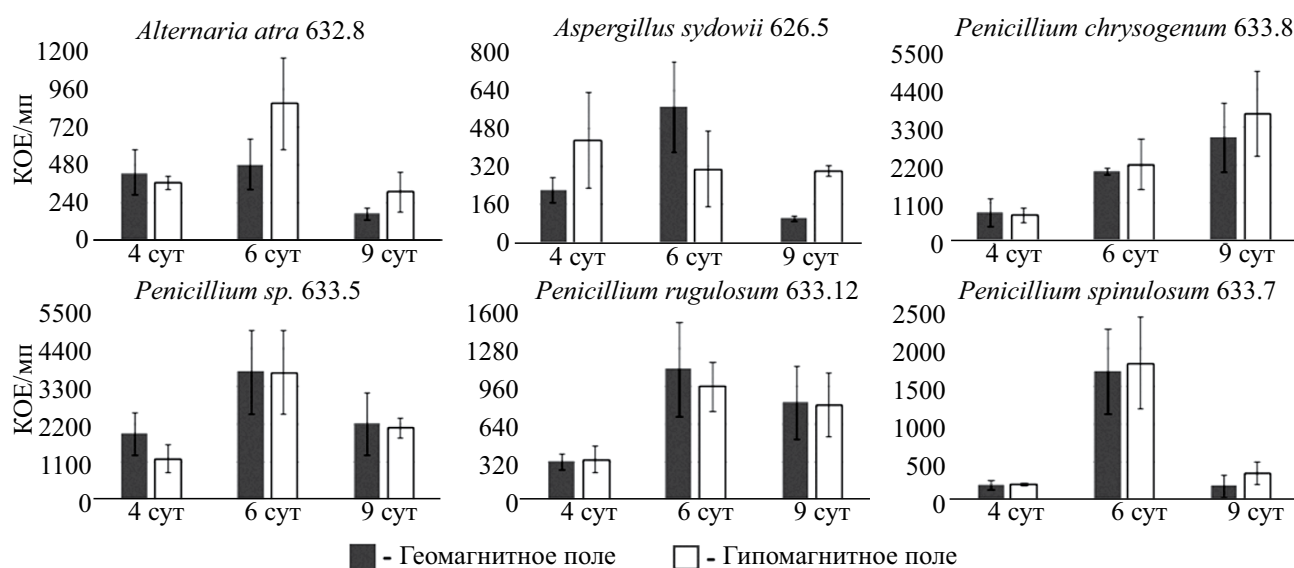


Рис. 1. Численность жизнеспособных спор тест-культур микроскопических грибов при выдерживании посевов в стандартном геомагнитном поле (контроль) и ГМП не более 45 нТл (эксперимент) в течение 4, 6 и 9 сут.

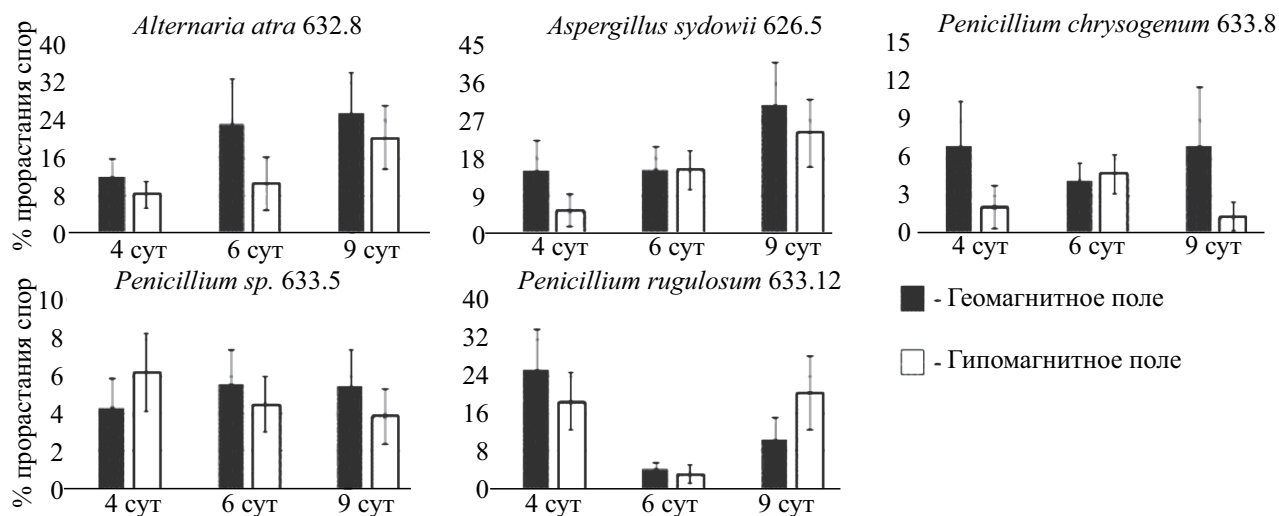


Рис. 2. Процент прорастания спор тест-культур микроскопических грибов при их выдерживании в стандартном геомагнитном поле (контроль) и ГМП не более 45 нТл (эксперимент) в течение 4, 6 и 9 сут.

грибов во внутренние объемы космических объектов происходит при их строительстве и эксплуатации, а также при осуществлении грузопотоков с Земли транспортными кораблями (Novikova et al., 2009). Полученные результаты позволяют предполагать, что ГМУ не будут являться ингибирующим или, наоборот, стимулирующим фактором, влияющим на жизнеспособность микромицетов в искусственной среде обитания лунных комплексов. Очевидно, что при возникновении благоприятных условий на борту будущей окололунной орбитальной станции или во внутреннем объеме лунной форпостной базы споры грибов будут прорастать аналогичным образом, как и в среде обитания МКС, даже несмотря на постоянный гипомагнитный фон.

Влияние ГМП на скорость роста и морфологию. Оценка скорости роста колоний тест-культур микроскопических грибов в ГМУ и геомагнитном поле показала, что выдерживание тест-культур в ГМП, не превышающем 45 нТл, не повлияло на их рост на питательной среде. Скорость роста колоний всех использованных в исследовании грибных штаммов при всех сроках экспонирования в ГМУ достоверно не отличалась от контрольной группы грибов, культивируемых в геомагнитных условиях в течение аналогичных сроков (рис. 3).

Полученные результаты согласуются с данными одного из крайне редких исследований, посвященных изучению влияния сверхслабых МП на развитие микромицетов, где при экспонировании колоний *Ulocladium consortiale* и *Neurospora crassa* в сниженном до 2 мкТл геомагнитном поле радиальная скорость роста была сопоставима с контролем или снижалась не более чем на 5% (Быстрова и соавт., 2009). Кроме того, авторами данной работы было

обнаружено, что выдерживание культур в ГМУ приводит к значительным изменениям в спорообразовании и морфологии клеток микромицетов. При экспонировании *N. crassa* в сверхслабом МП отмечалась задержка спороношения на 4–6 сут в сравнении с контрольными образцами. Колонии *U. consortiale* характеризовались менее интенсивным спороношением, чем контрольные, что, по мнению авторов, могло свидетельствовать о частичном ингибировании и/или нарушении процессов образования конидий. Фаза спороношения у колоний из последовательно полученных поколений штамма *U. consortiale*, экспонированного в ГМУ, наступала со все более значительным запаздыванием относительно исходного контроля, не подвергавшегося воздействию ГМУ (Быстрова и соавт., 2009). Следует отметить, что в нашем исследовании фаза спороношения была ярко выражена как у экспериментальных, так и у контрольных колоний уже к первому сроку наблюдения (4-е сут). Возможно, спорообразование у выбранных штаммов могло тормозиться на более ранних сроках выдерживания в ГМУ, однако более короткие сроки воздействия ГМП в нашем исследовании не изучались.

В другой работе той же группы исследователей было установлено, что после воздействия сверхслабых МП в диапазоне индукции 1–100 нТл у клеток грибного мицелия видов *U. consortiale*, *Neurospora crassa* и *Mucor* sp., начиная со второго поколения, вместо прямолинейного полярного роста отмечался выраженный кругообразный рост (Панина и соавт., 2012; Panina et al., 2019). Согласно нашим наблюдениям, характер роста мицелия тест-культур в ГМУ и в стандартных условиях МП Земли был аналогично прямолинейным с небольшой волнистостью на концах гиф.

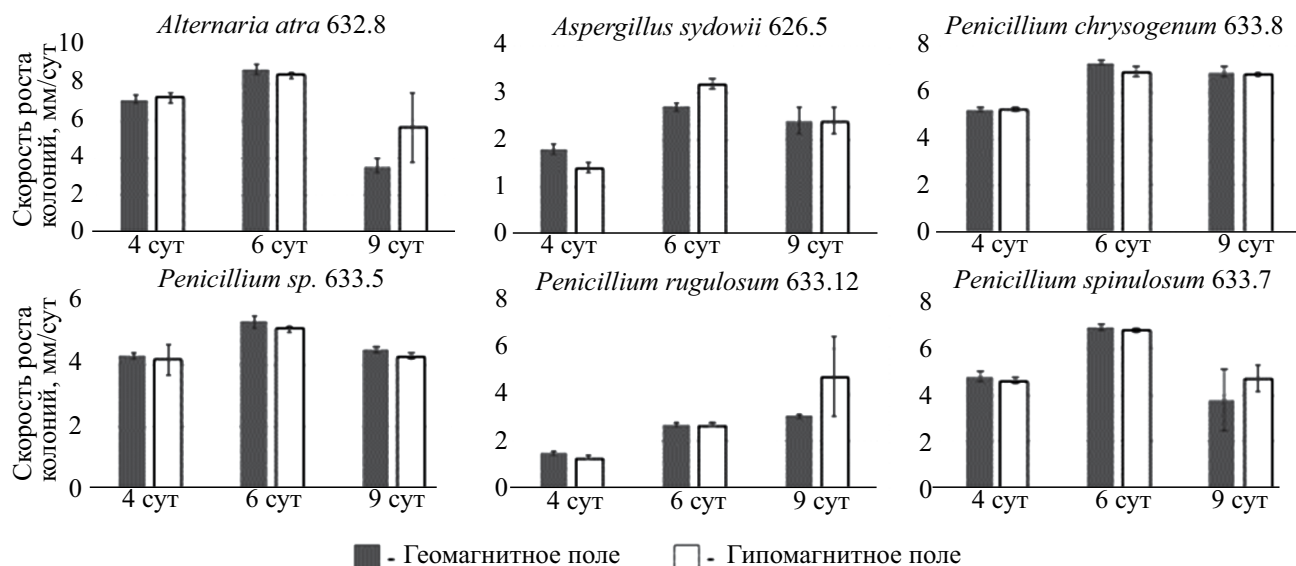


Рис. 3. Радиальная скорость роста колоний тест-культур микроскопических грибов при их культивировании в стандартном геомагнитном поле (контроль) и ГМП не более 45 нТл (эксперимент) в течение 4, 6 и 9 сут.

Однако в наших экспериментах мы изучали тест-культуры первого поколения, то есть те, что испытывали воздействие ГМУ, тогда как обнаруженные в вышеупомянутых исследованиях магнитобиологические эффекты проявлялись у микроскопических грибов в последующих поколениях, полученных из экспериментальных тест-культур путем их культивирования в нормальных геомагнитных условиях.

Влияние ГМП на интенсивность обрастания материалов. Как известно, среда космических объектов является своеобразной антропогенно-технологической нишей обитания определенных групп микроорганизмов, в которой конструкционные и декоративно-отделочные материалы, выполняя функции специфических субстратов, являются одним из основных местообитаний бактерий и грибов (Викторов и соавт., 1995; Novikova et al., 2009). Попадая на различные материалы, микроскопические грибы быстро приспосабливаются к ним и начинают свою жизнедеятельность.

Исследование интенсивности обрастания полимерных и металлических материалов тест-культурами микроскопических грибов в ГМУ в течение 14 сут показало, что ГМП величиной не более 45 нТл в 10 из 18 случаев не оказывало влияние на рост, в 7 — происходила стимуляция роста, и лишь в 1 случае наблюдали его снижение по сравнению с контролем. Более интенсивный рост в ГМУ по сравнению с геомагнитными условиями отмечался у смеси тест-культур на образцах алюминия и резины, у *A. sydowii* 626.5 — также на алюминии и резине, *P. chrysogenum* 633.8

и *P. rugulosum* 633.12 только на резине, а у *P. spinulosum* 633.7 только на алюминии. Менее интенсивный рост микромицетов в ГМУ наблюдался только у *P. rugulosum* 633.12 на образцах фторопласта (рис. 4).

Экспонирование материалов в течение 28 сут в ГМУ также в большинстве случаев не отразилось на интенсивности обрастания образцов, рост на экспериментальных образцах был одинаковым по сравнению с контролем в 13 из 18 случаев, в 4 случаях происходила стимуляция роста микромицетов и в 1 случае он тормозился. Более интенсивный рост в ГМУ наблюдался на резине у смеси тест-культур, *A. sydowii* 626.5, *P. chrysogenum* 633.8 и *P. rugulosum* 633.12, а менее интенсивный — у *Alternaria atra* 632.8 на фторопласте (рис. 4).

Интересно отметить, что более подверженным к обрастанию в ГМУ материалом оказалась резина, тогда как обрастание фторопласта происходило одинаково во всех условиях эксперимента или более интенсивно в геомагнитном поле.

Влияние ГМП на интенсивность дыхания. Исследование влияния ГМУ на интенсивность дыхания микромицетов, развивающихся на поверхностях материалов, также показало, что экспонирование зараженных образцов в ГМП не более 45 нТл в основном не отражалось на дыхательной активности тест-культур либо оказывало стимулирующее воздействие. Ингибирование дыхания микромицетов происходило лишь в единичных случаях. Так после 28 сут экспонирования образцов материалов в ГМУ уровень продукции углекислого газа тест-культурами не изменялся по сравнению с контролем в 13 из 18 случаев, увеличивался в 4

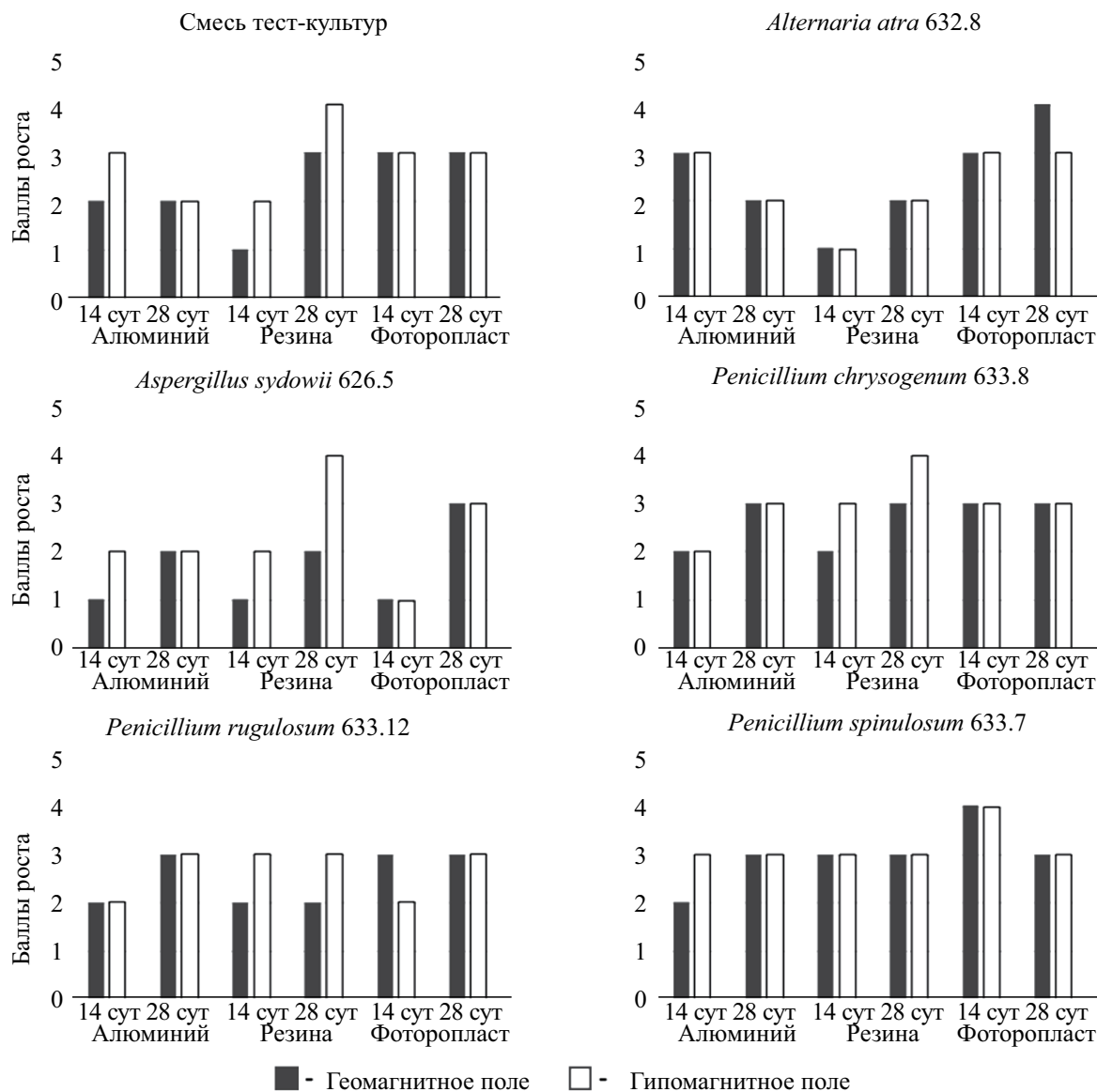


Рис. 4. Балльная оценка роста тест-культур микроскопических грибов на образцах конструкционных материалов после 14 и 28 сут экспонирования в стандартном геомагнитном поле (контроль) и ГМП не более 45 нТл (эксперимент).

и становился меньше в 1 случае. Дыхание стимулировалось у смеси тест-культур на образцах резины и фторопласта, *P. rugulosum* 633.12 на образцах фторопласта и *Alternaria atra* 632.8 — на алюминии. Ингибирующий эффект ГМП отмечался лишь у *Alternaria atra* 632.8 на резине (рис. 5).

За исключением двух работ, упомянутых выше, в научной литературе отсутствует описание исследований, посвященных изучению влияния ГМУ на жизнедеятельность микроскопических грибов. Однако, если говорить о влиянии ГМУ на бактерии, то в одном из очень редких исследований, посвященных этой теме, отмечается стимулирующее воздействие ГМУ на бактериальный рост.

Согласно результатам этой работы, экранирование МП Земли до 100–1000 нТл приводит к многократному увеличению роста, скорости деления клеток и снижению спорообразования у *Bacillus subtilis* (Obhodaš et al., 2021). О заметном увеличении скорости роста в ГМУ бактерий вида *Escherichia coli* сообщалось в более ранних исследованиях (Dubrov, 1978).

Кроме того, бактерии *E. coli* становились объектами биофизических исследований, направленных на поиски универсальных механизмов по взаимодействию с ГМП от нескольких нТл. Авторам этой работы удалось показать, что ГМП взаимодействуют с протеин-связанными ионами Ca^{2+} , Mg^{2+}

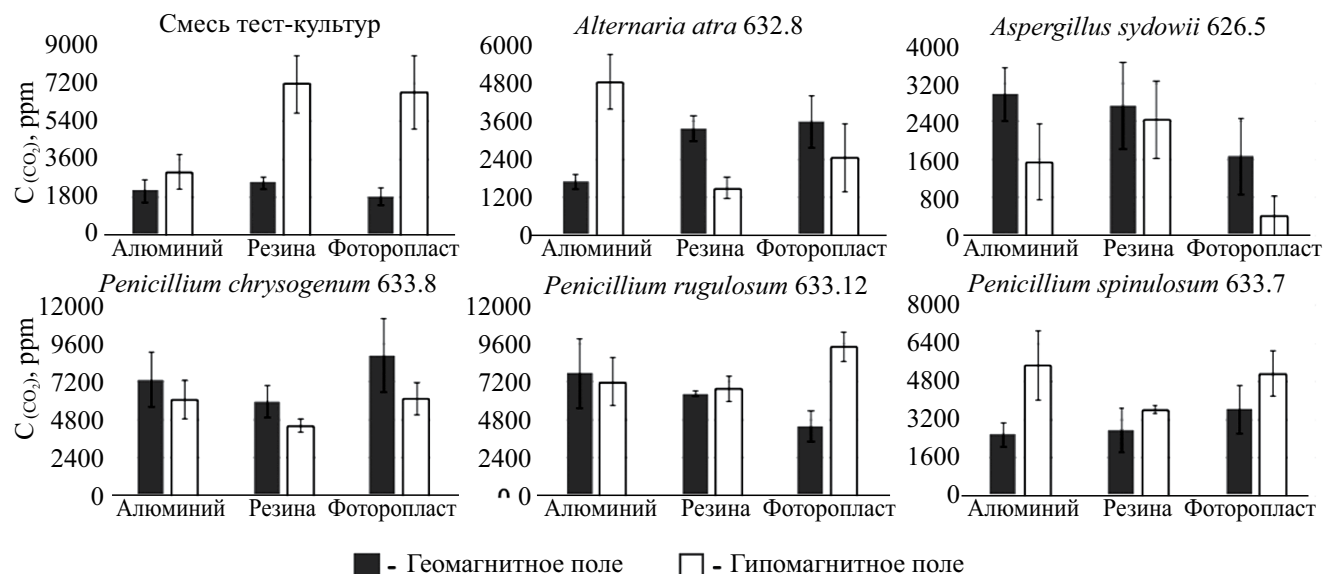


Рис. 5. Продукция углекислого газа тест-культурами микроскопических грибов, развивающихся на образцах конструкционных материалов в стандартном геомагнитном поле (контроль) и ГМП не более 45 нТл (эксперимент).

и Zn^{2+} и влияют на их диссоциацию с белками. Также авторы предполагают, что носителями этих белков является ДНК (Binhi et al., 2001).

Относительно поиска универсальной физической модели, описывающей влияние ГМП на все живые системы, существует обзор, в котором проанализировано более двухсот известных в этой области магнитобиологии работ (Binhi et al., 2017). На основе тщательного анализа этих исследований авторы не находят статистических корреляций между эффектами от воздействия ГМП на различные организмы и параметрами ГМП, их типом и продолжительностью экспозиций. Это, в свою очередь, говорит об отсутствии какой-либо общей биофизической магнитной мишени, которая была бы одинаковой для всех организмов. По мнению авторов, общей для всех организмов является неспецифичная магниторецепция, проявляющаяся случайно в виде различных биологических откликов и являющаяся результатом взаимодействия ГМП с внутриклеточными магнитными моментами, которые присутствуют всегда в макромолекулах и белках (Binhi et al., 2017).

Те же авторы в целом отмечают низкую воспроизводимость результатов магнитобиологических экспериментов. В силу большой длины и неконтролируемости процессов трансформации сигнала МП в измеряемый биологический параметр, отсутствие эффекта в конкретном эксперименте является нормальным. Наблюдение магнитобиологического эффекта, как отмечено многими исследователями, обусловлено попаданием во временные окна — интервалы времени, когда биологические системы в состоянии проявить чувствительность к МП

(Бинги и соавт., 2003). С этим, по всей видимости, связаны наблюдаемые нами различия в реакциях на ГМУ одних и тех же тест-культур при их развитии на образцах материалов.

Влияние ГМП на антагонистические свойства. Микроскопические грибы, наряду с бактериями, являются главными составляющими микробного сообщества искусственной среды пилотируемых космических комплексов. Как известно, во многом преобладание той или иной группы микроорганизмов в структуре микробного сообщества определяется антагонистическими взаимодействиями между представителями этих групп. В связи с этим для лучшего понимания конкурентных взаимоотношений между грибами и бактериями в среде обитания будущих лунных комплексов нами было изучено влияние ГМУ на антагонистические свойства грибов.

В рамках данного исследования было установлено, что из шести выбранных штаммов грибов, выращенных в геомагнитных условиях, антагонистами бактерий являлись четыре штамма. Наиболее ярко антагонистические свойства были выражены у *P. rugulosum* 633.12, ингибировавшего рост всех четырех тест-культур бактерий. Штаммы *A. sydowii* 626.5 и *Penicillium* sp. 633.5 характеризовались достоверным подавлением роста трех бактериальных тест-культур, а *P. chrysogenum* 633.8 — только двух, однако образуя максимальный диаметр зоны подавления. При этом тест-культуры *A. sydowii* 626.5, *Penicillium* sp. 633.5, *P. chrysogenum* 633.8, выращенные в ГМП не более 45 нТл, сохраняли свои антагонистические свойства на том же уровне, тогда как штамм *P. rugulosum* 633.12 терял их полностью

Таблица 2. Ширина зоны подавления роста бактерий вокруг агаровых блоков тест-культур микроскопических грибов, выращенных в геомагнитном поле (1) и ГМП не более 45 нТл (2)

Штамм	Ширина зоны подавления роста, мм							
	<i>B. licheniformis</i>		<i>B. pumilus</i>		<i>B. subtilis</i>		<i>S. saprophyticus</i>	
	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>A. sydowii</i> 626.5	Н.о.*	Н.о.	2.7 ± 0.9	3.0 ± 1.4	7.7 ± 3.9	2.7 ± 0.9	2.0 ± 0.0	2.0 ± 0.0
<i>P. chrysogenum</i> 633.8	Н.о.	Н.о.	15.7 ± 3.1	10.7 ± 2.6	15.3 ± 1.7	14.7 ± 1.3	Н.о.	Н.о.
<i>Penicillium</i> sp. 633.5	Н.о.	Н.о.	2.7 ± 1.5	6.3 ± 4.8	12.0 ± 0.8	14.7 ± 3.4	1.7 ± 0.1	2.7 ± 0.9
<i>P. rugulosum</i> 633.12	11.0 ± 1.4	Н.о.	11.3 ± 1.3	Н.о.	11.7 ± 1.3	Н.о.	6.7 ± 4.7	Н.о.
<i>P. spinulosum</i> 633.7	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
<i>Alternaria atra</i> 632.8	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.

*Н.о. – Зона подавления роста не обнаружена.

по отношению ко всем четырем тестируемым штаммам бактерий (табл. 2).

Данный эксперимент показал, что сверхслабые МП способны значительно ослаблять антагонистические свойства некоторых микромицетов, что может негативно влиять на их долю и активность при формировании микробного сообщества в ГМУ Луны.

Полученные в проведенном исследовании результаты позволяют сделать предварительные выводы об отсутствии каких-либо статистически значимых изменений в жизнеспособности грибов при воздействии ГМП не более 45 нТл в течение 4–9 сут. Количественный уровень и процент прорастания спор тестируемых штаммов в ГМУ не изменялись по сравнению с геомагнитными условиями. В то же время интенсивность роста микромицетов хоть и была одинаковой при их культивировании на питательной среде в ГМУ и геомагнитных условиях, однако в ряде случаев заметно стимулировалась на поверхности образцов материалов в ГМУ. Вероятно, при воздействии ГМП микромицеты задействуют адаптационные механизмы, обеспечивающие их более интенсивное развитие лишь в условиях ограниченной доступности питательных элементов.

Таким образом, можно предполагать, что ГМУ будут в некоторой степени стимулировать развитие микроскопических грибов в микрореконструкции будущих лунных космических комплексов, тем самым увеличивая вероятность технических рисков, связанных с процессами биодеструкции конструкционных материалов. С другой стороны, наблюдаемое в ряде случаев снижение антагонистической активности грибов в ГМУ может позволить бактериям активно осуществлять свою жизнедеятельность и эффективнее конкурировать за питательный ресурс. В целом, необходимо подчеркнуть, что имеющиеся на данный момент в научном мире сведения по влиянию сверхслабых МП на микроорганизмы являются явно недостаточными для

точного прогнозирования возможных биологических эффектов, способных возникнуть при их взаимодействии с ГМП Луны. Поэтому создание системного научного подхода по изучению влияния ГМУ на жизнедеятельность микроорганизмов является важнейшей научной и практической задачей. Наличие такого методического подхода и его реализация на типичных представителях микробного сообщества космических объектов позволит нам реально оценить всю степень микробиологических рисков в столь новом для микроорганизмов местообитании.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке бюджетной темы фундаментальных исследований FMFR-2024-0035, при использовании оборудования, приобретенного НИИЯФ МГУ за счет Программы развития Московского университета.

СОБЛЮДЕНИЕ
ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бинги В.Н., Савин А.В. Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические

- системы // Успехи физ. наук. 2003. Т. 173. № 3. С. 265–300.
- Быстрова Е. Ю., Богомолова Е. В., Гаврилов Ю. М., Панина Л. К., Стефанов В. Е., Сурма С. В., Щеголев Б. Ф. Влияние постоянного магнитного и экранированного геомагнитного полей на развитие колоний микромицетов // Микология и фитопатология. 2009. Т. 43. С. 438–446.
- Викторов А. Н., Новикова Н. Д., Поликарпов Н. А., Горшков В. П., Константинова С. В. Актуальные проблемы микробиологической безопасности среды обитания орбитальных станций в условиях многолетней эксплуатации // Авиакосмическая и экологическая медицина. 1995. Т. 29. № 5. С. 51–55.
- Гудошников С. А., Венедиктов С. Н., Гребенищев Ю. Б., Кузнецов П. А., Маннинен С. А., Васильева О. В., Криволапова О. Н., Труханов К. А., Круглов О. С., Спасский А. В. Экранирующая камера для ослабления магнитного поля Земли на основе рулонных магнитных материалов // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 58–61.
- Касатова Е. С., Стручкова И. В., Аникина Н. А., Смирнов В. Ф. Действие слабого низкочастотного электромагнитного поля на активность экстрацеллюлярных оксидоредуктаз *Trichoderma virens* // Микология и фитопатология. 2017. Т. 51. С. 99–103.
- Легостаев В. П., Лопота В. А. Луна – шаг к технологиям освоения Солнечной системы. М.: РКК “Энергия”, 2011. 584 с.
- Макаров И. О., Ключев Д. А., Смирнов В. Ф., Смирнова О. Н., Аникина Н. А., Дикарева Н. В. Действие низкочастотного магнитного поля и низкоинтенсивного лазерного излучения на активность оксидоредуктаз и рост микромицетов – активных деструкторов полимерных материалов // Микробиология. 2019. Т. 88. С. 83–90.
- Makarov I. O., Klyuev D. A., Smirnov V. F., Smirnova O. N., Anikina N. A., Dikareva N. V. Effect of low-frequency pulsed magnetic field and low-level laser radiation on oxidoreductase activity and growth of fungi active destructors of polymer materials // Microbiology (Moscow). 2019. V. 88. P. 72–78.
- Панина Л. К., Богомолова Е. В., Гаврилова Ю. М., Дмитриев С. П., Доватор Н. А. Аномальный полярный рост мицелия в условиях “магнитного вакуума” // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46. С. 81–85.
- Albertini M. C., Accorsi A., Citterio B., Burattini S., Piacentini M. P., Ugucioni F., Piatti E. Morphological and biochemical modifications induced by a static magnetic field on *Fusarium culmorum* // Biochimie. 2003. V. 85. P. 963–970.
- Belosokhov A., Yarmeeva M., Kokaeva L., Chudinova E., Mislavskiy S., Elansky S. *Trichocladium solani* sp. nov. – a new pathogen on potato tubers causing yellow rot // J. Fungi (Basel). 2022. V. 8. Art. 1160.
- Binhi V. N., Alipov Y. D., Belyaev I. Y. Effect of static magnetic field on *E. coli* cells and individual rotations of ion-protein complexes // Bioelectromagnetics. 2001. V. 22. P. 79–86.
- Binhi V. N., Prato F. S. Biological effects of the hypomagnetic field: an analytical review of experiments and theories // PLoS One. 2017. V. 12. Art. e0179340.
- Dubrov A. P. The geomagnetic field and life: Geomagnetobiology. New York City, USA. Springer, 1978. 318 p.
- Erdmann W., Kmita H., Kosicki J. Z., Kaszmarek L. How the geomagnetic field influences life on earth – an integrated approach to geomagnetobiology // Orig. Life Evol. Biosph. 2021. V. 51. P. 231–257.
- Nagy P., Fischl G. Effect of static magnetic field on growth and sporulation of some plant pathogenic fungi // Bioelectromagnetics. 2004. V. 25. P. 316–318.
- Moore R. L. Biological effects of magnetic fields: studies with microorganisms // Can. J. Microbiol. 1979. V. 25. P. 1145–1151.
- Novikova N. D., Pierson D. L., Poddubko S. V., Deshevaeva Y. A., Ott C. M., Castro V. A., Bruce R. J. Microbiology of the International Space Station. In US and Russian cooperation in space biology and medicine / Eds. Sawin C. F., Hanson S. I., House N. G., Pestov D. I. Reston, Virginia: American institute of aeronautics and astronautics, 2009. V. 5. 469 p.
- Obhodaš J., Valković V., Kollar R., Hrenović J., Nad K., Vinković A., Orlić Ž. The growth and sporulation of *Bacillus subtilis* in nanotesla magnetic fields // Astrobiology. 2021. V. 21. P. 323–331.
- Panina L. K., Bogomolova E. V., Dmitriev S. P., Dovator N. A. Investigation of the structural reorganization of micromycetes in hypomagnetic fields // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1400. Art. 033016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/3/033016>
- Pazur A., Schimek C., Galland P. Magnetoreception in microorganism and fungi // Cent. Eur. J. Biol. 2007. V. 2. P. 597–659.
- Ruiz-Gomez M. J., Prieto-Barcia M. I., Ristori-Bogajo E., Martinez-Morillo M. Static and 50 Hz magnetic fields of 0.35 and 2.45 mT have no effect on the growth of *Saccharomyces cerevisiae* // Bioelectrochem. 2004. V. 64. P. 151–155.
- Sinčák M., Sedlakova-Kadukova J. Hypomagnetic fields and their multilevel effects on living organisms // Processes. 2023. V. 11. Art. 282.
- Volpe P. Interactions of zero-frequency and oscillating magnetic fields with biostructures and biosystems // Photochem. Photobiol. Sci. 2003. V. 2. P. 637–648.
- White T. J., Bruns T. D., Lee S. B., Taylor J. W. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics // PCR Protocols: A guide to methods and applications / Eds. Innis M. A., Gelfand D. H., Sninsky J. J., White T. J. New York: Academic Press, 1990. P. 315–322.

Features of Development of Microscopic Fungi in Conditions of Ultra-Weak Magnetic Fields

V. D. Rodimin¹, S. A. Kharin¹, *, S. V. Poddubko¹, A. V. Kurakov², S. A. Kulachkova²,
M. M. Yarmeeva², V. M. Lebedev³, A. V. Spassky³

¹*Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow 123007, Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Moscow 119234, Russia*

³*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

*e-mail: charin@imbp.ru

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of ultra-weak magnetic fields (MF) on the viability, growth characteristics, respiratory activity, and antagonistic properties of microscopic fungi. The experiments were conducted on strains isolated from the interior of the International Space Station. To create hypomagnetic conditions (HMC), the hypomagnetic chambers GMK-1 and GMK-2, shielding the Earth's MF, were used in the experiments. The chamber walls are a two-section magnetic screen made of amorphous permalloy tape. In the experiments, the GMK chambers made it possible to reduce the geomagnetic field by 1000–2000 times. The maximum value of the MF after demagnetization did not exceed 45 nT. It was found that the hypomagnetic field (HMC) did not have a predominantly inhibitory and/or stimulating effect on the viability of spores and the growth of fungal colonies, as indicated by the absence of reliable changes in the quantitative level, percentage of spore germination and radial growth rate of the tested strains in the HMC compared to geomagnetic conditions. At the same time, the growth and respiration rate of micromycetes in some cases was significantly stimulated in the GMF during their development on the surface of samples of structural materials under conditions of limited availability of nutrients. It was also found that the GMF affects the antagonistic properties of some microscopic fungi. The *Penicillium rugulosum* 633.12 strain grown in the GMF completely lost its antagonistic activity towards bacteria, which was found to be high when cultivated under standard geomagnetic conditions. The results obtained are discussed in the context of the features of microbial colonization of the habitat of future lunar complexes.

Keywords: microscopic fungi, hypomagnetic field, hypomagnetic conditions of the Moon, habitat of space complexes, structural materials