

МИКОЛОГИЯ И АЛЬГОЛОГИЯ

УДК 582.28+579.65

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЁТА
НА ЖИЗНЕСПОСОБНОСТЬ МИКРОМИЦЕТОВВ.Б. Понизовская^{1,*}, М.Ю. Дьяков¹, А.Б. Антропова²,
Е.Н. Биланенко¹, В.Л. Мокеева¹, В.К. Ильин³

¹ Кафедра микологии и альгологии, биологический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, к. 12;

² НИИ вакцин и сывороток имени И.И. Мечникова; Россия, 105064, г. Москва, Малый Казенный пер., д. 5а;

³ Институт медико-биологических проблем РАН, Россия, 123007, г. Москва, Хорошевское шоссе, д. 76А;
*e-mail: v.ponizovskaya@gmail.com

Изучение жизнеспособности микромицетов в условиях космического полёта проводили на российском научно-исследовательском спутнике Фотон-М4. Длительность полёта спутника составила 45 сут. Для исследования были отобраны 13 видов грибов из 10 родов, выделенные из строительных материалов на минеральной основе. Споры грибов вносили в стерильный кварцевый песок; песок со спорами помещали в полипропиленовые пробирки фирмы Errendorf (Германия). Во время космического полёта пробирки со спорами находились либо внутри спутника в контейнерах “Биоконт”, либо снаружи спутника в контейнерах “Экзобиофрост”. При взлёте и посадке контейнеры “Экзобиофрост” были плотно закрыты крышкой, а на орбите во время всего полёта крышка модуля с контейнерами была открыта для помещения образцов в условия открытого космоса. Споры 10 из 13 (77%) исследованных видов грибов (*Acremonium charticola*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus versicolor*, *Chaetomium globosum*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium verrucosum*, *Purpureocillium lilacinum*, *Sarocladium kiliense* и *Trichoderma harzianum*) выжили после полёта как внутри, так и снаружи спутника. Споры лишь 3 видов (23% от всех исследуемых видов), *Acremonium furcatum*, *Engyodontium album* и *Verticillium zaregamianum*, полностью погибли после полёта как внутри, так и снаружи спутника. Выживаемость спор варьировала в зависимости от вида гриба. Таким образом, споры грибов обладали способностью выживать при действии комплекса стрессовых факторов, таких как низкая температура, радиация и т.д. Микромицеты можно рассматривать как модель высокой устойчивости эукариотических организмов к стрессовым факторам, предел экологической пластичности которых крайне высок и даже выходит за границы этого показателя для земных местообитаний.

Ключевые слова: экзобиология, Фотон-М4, космический полёт, факторы космического полёта, грибы, микромицеты, жизнеспособность.

В настоящее время активное развитие получила экзобиология — наука о происхождении, эволюции и распространении жизни на земле [1, 2]. Одна из важных теорий в экзобиологии — панспермия, предполагающая, что propagулы живых организмов способны распространяться по всей Вселенной и развиваться при благоприятных условиях [2]. Позже панспермия была трансформирована в литопанспермию, гипотезу о возможности переноса propagул живых организмов посредством метеоритов [3]. Несмотря на то, что панспермия сильно подвергалась критике, в настоящее время её состоятельность широко обсуждается.

Влияние факторов открытого космоса на жизнеспособность живых организмов долгое время изучалось лишь на Земле в лабораторных условиях. В 1967 г., с запуском первого в мире космического аппарата “Спутник”, началась новая эра в исследовании космоса и, как следствие, развитие астробиологии [2]. Благодаря современным технологиям,

стало возможно изучение влияния условий космического полёта на организмы не только внутри космических аппаратов, но также и в открытом космосе. Такие исследования позволяют доказать или опровергнуть теории панспермии и литопанспермии.

В рамках экзобиологических исследований была продемонстрирована устойчивость спор бактерий к ряду факторов открытого космоса, таких как вакуум, низкая температура, радиация [4, 2]. Споры бактерий сохранили жизнеспособность даже после 6-летнего пребывания в открытом космосе с защитой от ультрафиолетового излучения [4].

Что касается эукариотических организмов, то есть сведения о том, что лишайники выживали после 2-недельного пребывания в открытом космосе [5]. Ещё одним перспективным объектом для экзобиологии являются грибы. Это связано с их способностью выживать в экстремальных условиях, зачастую неприемлемых для других организмов. Микромицеты наименее чувствительны к недо-

статку влаги по сравнению с другими микроорганизмами, причем некоторые грибы способны существовать при крайне низких значениях активности воды субстрата, достигающих 0,6 и даже ниже [6]. Кроме того, микромицеты могут проявлять устойчивость к высоким и низким температурам. Так, споры *Aspergillus fumigatus* оставались жизнеспособными при -32°C , а некоторые представители родов *Aspergillus* и *Cladosporium* — даже при -196°C [7, 8]. Показана устойчивость грибов *A. fumigatus*, *Hormoconis resinae*, *Phialophora* sp. к высоким температурам: до 80°C , 60°C и 55°C , соответственно [9]. Интенсивное ионизирующее излучение может быть даже благоприятным для развития грибов, в отличие от других организмов [10].

Что касается астробиологических исследований, проводившихся с грибами, то, по данным литературы, микромицеты обнаружены внутри Международной космической станции (МКС) [11] и станции “Мир” [12]. Кроме того, чёрные дрожжеподобные грибы выжили как в искусственно созданных условиях открытого космоса и Марса в лаборатории, так и после 1,5-летнего космического полёта при наличии защиты от полного спектра космического излучения [3]. Более того, споры *Aspergillus ochraceus* перенесли влияние космического излучения и вакуума [13], а споры *Trichoderma longibrachiatum* выжили после 2-летнего космического полёта [14].

Тем не менее, сведений о влиянии условий космического полёта на грибы на настоящий момент накоплено недостаточно.

Целью настоящей работы является изучение влияния условий космического полёта на жизнеспособность спор микромицетов как внутри, так и снаружи космического аппарата.

Материалы и методы

Работа проводилась в рамках программы экспериментов на космическом аппарате (КА) Фотон-М4. Это российский научно-исследовательский спутник, разработанный для проведения экспериментов в различных областях науки. Его запуск состоялся 18 июля 2014 г., длительность полёта составила 45 сут, аппарат вернулся на Землю 1 сентября 2014 г. Полёт проходил по эллипсоидной орбите (252 км в перигее и 531 км в апогее).

Для исследования были отобраны 13 видов грибов из 10 родов, включающие как светло-, так и тёмноокрашенные виды из разных таксономических групп, способные осваивать разные экологические ниши (таблица). Использованные в работе микромицеты были выделены из интерьеров храмов и музейных помещений в городах Москве и Твери, а также в городах и селах Владимирской области. Пробы для выделения микромицетов отбирали в интерьерах объектов с участков стен с признаками деструкции строительных материалов, представля-

Таблица

Исследованные микромицеты

Вид	Номер штамма	Место выделения*	Субстрат
<i>Acremonium charticola</i> (Lindau) W. Gams	Cos1	1	белый камень
<i>Acremonium furcatum</i> Moreau & R. Moreau ex W. Gams	Cos2; VTT D151583	2	штукатурка
<i>Aspergillus niger</i> Tiegh.	Cos3	3	штукатурка
<i>Aspergillus versicolor</i> (Vuill.) Tirab.	Cos4	3	штукатурка
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze	Cos5	3	штукатурка
<i>Cladosporium sphaerospermum</i> Penz.	Cos6	1	белый камень
<i>Engyodontium album</i> (Limber) de Hoog	Cos7	3	штукатурка
<i>Penicillium chrysogenum</i> Thom	Cos8	3	штукатурка
<i>Penicillium verrucosum</i> Dierckx	Cos9	4	штукатурка
<i>Purpureocillium lilacinum</i> (Thom) Luangsa-ard, Houbraken, Hywel-Jones & Samson	Cos10	3	штукатурка
<i>Sarocladium kiliense</i> (Grütz) Summerb.	Cos11	3	штукатурка
<i>Trichoderma harzianum</i> Rifai	Cos12	5	белый камень
<i>Verticillium zaregamsianum</i> Inderb., Usami, Kanto, R.M. Bostock, R.M. Davis & Subbarao	Cos13	1	белый камень

* 1 — посёлок Боголюбово, Владимирская обл., 2 — село Кидекша, Владимирская обл., 3 — г. Москва, 4 — г. Тверь, 5 — г. Юрьев-Польский, Владимирская обл.

ющих собой штукатурку и белый камень. Штаммы были депонированы в коллекцию грибов кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ (№ Cos 1–16), штамм *Acremonium furcatum* был, кроме того, депонирован в коллекцию VTT (Финляндия) (№ D151583).

Споры исследуемых грибов вносили в стерильный кварцевый песок, не содержащий органических примесей, в концентрации 10^5 КОЕ/г, тщательно перемешивали. Песок со спорами поместили в полипропиленовые пробирки фирмы Eppendorf (Германия) по 0,25 г (в 8 повторностях для каждого вида гриба). Толщина стенок и крышек пробирок составляла 0,75 мм.

Во время полёта пробирки со спорами находились внутри спутника как в контейнерах “Биоконт” (в двух повторностях для каждого вида гриба) (рис. 1, А), так и в контейнерах “Экзобиофрост”, размещённых на наружной поверхности спутника (в трёх повторностях для каждого вида гриба). В качестве контроля пробирки со спорами инкубировались в лаборатории (в трёх повторностях) при комнатной температуре на воздухе на протяжении всего полёта спутника (45 сут). Во время полёта пробирки со спорами находились внутри спутника как в контейнерах “Биоконт” (в двух повторностях для каждого вида гриба) (рис. 1, А), так и в контейнерах “Экзобиофрост”, размещённых на наружной поверхности спутника (в трёх повторностях для каждого вида гриба) (рис. 1, Б, 1, В). Контейнеры “Экзобиофрост” представляли собой металлические цилиндры, внутри которых были закреплены стаканы из кварцевого стекла. Пробирки со спорами в стаканах были размещены в три ряда. Каждый контейнер был закрыт кварцевым стеклом толщиной 3 мм. При взлёте и посадке модуль с контейнерами был плотно закрыт крышкой, а на орбите во время всего полёта крышка была открыта для помещения образцов в условия открытого космоса. Как во внутренних, так и в наружных контейнерах находились датчики температуры и дозиметры, которые измеряли температуру и радиационный фон в течение всего полёта.

Во время полёта в контейнерах “Биоконт” температура колебалась от 14°C до 22°C, поглощённая доза излучения образцами за весь полёт составила 24 мГр.

В контейнерах “Экзобиофрост” на старте спутника температура составляла 22°C, затем в течение последующих 5 ч опустилась до –20°C и далее колебалась от –8°C до –20°C. Доза излучения, поглощённая образцами, составила от 45 до 225 мГр за все время полёта, или от 1 до 5 мГр в сутки в зависимости от расположения образца внутри контейнера. Наибольшую дозу получили верхние образцы, наименьшую — расположенные в самом низу (В. Шуршаков, личное сообщение).

Для определения жизнеспособности спор микроскопические образцы после полёта, а также контрольные пробы суспендировали в стерильной воде, полученную споровую суспензию высевали на питательную среду сусло-агар в трёх повторностях (0,2 мл суспензии на чашку). Посевы инкубировали в течение 10 сут при температуре 25°C. Условно считали, что каждая выросшая колония на чашке с питательной средой вырастает из одной колониеобразующей единицы (КОЕ), которая представляет собой спору гриба. Рассчитывали число КОЕ, приходящихся на грамм пробы.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью приложений Microsoft Excel 2013 и STATISTICA 6.0 (использовали функции “среднее значение” и “стандартное отклонение”).

Результаты

После 45-суточного полёта как внутри, так и снаружи КА выжили споры 10 из 13 видов грибов (77% всех исследованных): *Aspergillus versicolor*, *Chaetomium globosum*, *Purpureocillium lilacinum*, *Penicillium verrucosum*, *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus niger*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Sarocladium kiliense*, *Acremonium charticola* и *Trichoderma harzianum* (рис. 2). При этом у 5 (38%) изученных видов (*A. versicolor*, *C. globosum*, *P. lilacinum*, *A. charticola* и *T. harzianum*) количество выживших спор после полёта внутри спутника достоверно не отличалось от этого пока-

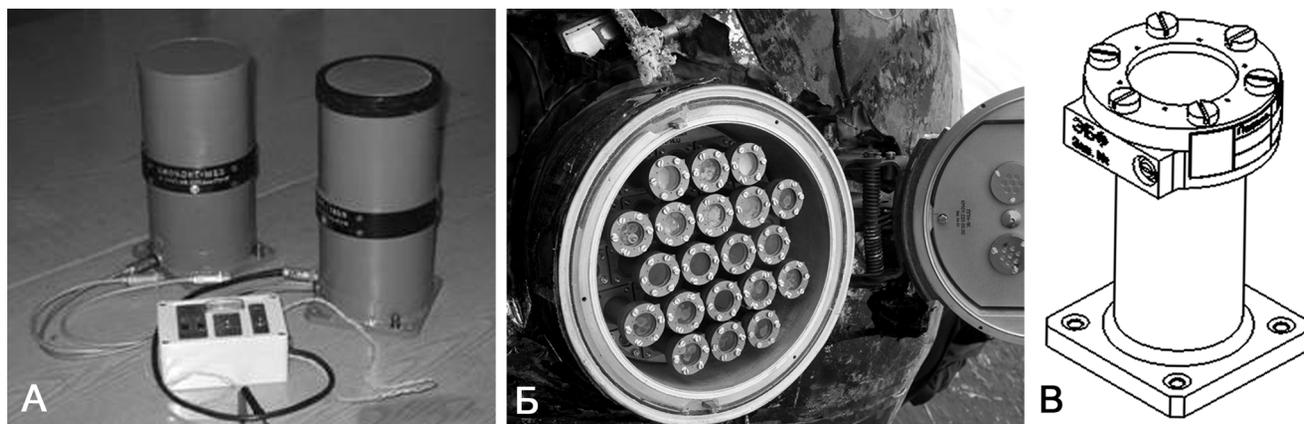


Рис. 1. Контейнеры, в которых располагались образцы во время полёта: А — “Биоконт”; Б — “Экзобиофрост”; В — схема контейнера “Экзобиофрост”

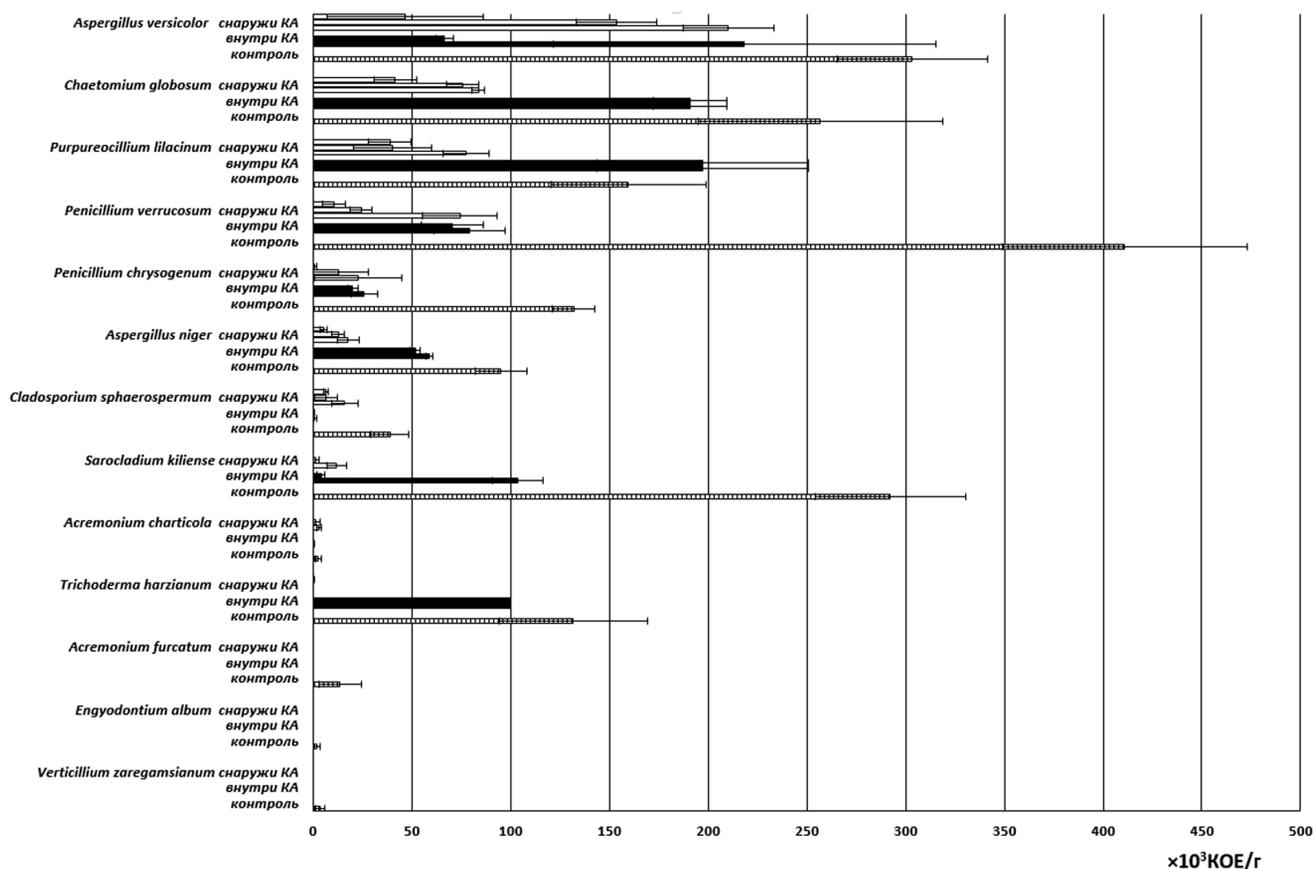


Рис. 2. Жизнеспособность спор микромицетов: снаружи КА — после полёта в контейнерах на наружной поверхности спутника, внутри КА — после полёта внутри спутника, контроль — в контрольных образцах, хранившихся в лаборатории

зателя для контрольных образцов, у остальных 5 из сохранивших жизнеспособность (38%) (*A. niger*, *C. sphaerospermum*, *P. chrysogenum*, *P. verrucosum* и *S. kiliense*) оно было ниже, чем в контроле. Из 10 выживших после полёта видов у 4 (40%) (*C. globosum*, *P. lilacinum*, *A. niger* и *T. harzianum*) число жизнеспособных спор было намного больше после полёта внутри КА, чем снаружи.

A. versicolor проявил наибольшую устойчивость к условиям космического полёта. Количество жизнеспособных спор этого гриба было высоким после полёта как внутри КА (достигая 218×10^3 КОЕ/г, что составило 72% от контроля), так и во внешних контейнерах (210×10^3 КОЕ/г, 69% от контроля). Количество жизнеспособных спор у 2 видов, *C. globosum* и *P. lilacinum*, также было высоким после космического полёта как во внутренних (191×10^3 КОЕ/г, 74% и 197×10^3 КОЕ/г, 100% от контроля, соответственно), так и во внешних контейнерах (84×10^3 КОЕ/г, 33% и 77×10^3 КОЕ/г, 48% от контроля, соответственно). Эти показатели были ниже, чем у *A. versicolor* во внешних контейнерах. Количество жизнеспособных спор 6 видов, *Penicillium verrucosum*, *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus niger*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Sarocladium kiliense* и *Trichoderma harzianum*, после полёта снаружи КА составило 18%; 17%; 19%; 41%; 4%; 0,2%, а внутри — 19%; 20%; 62%; 3%; 36%; 76% от такового в контрольных образцах. *Acremonium charticola* во всех вариантах опыта показал очень низкую жизнеспособность, при этом

количество выживших КОЕ снаружи КА и в контроле достоверно не отличались, а внутри составило 13% от контрольного значения.

У 3 видов (23% от всех исследуемых), *Acremonium furcatum*, *Engyodontium album* и *Verticillium zaregamsianum*, после космического полёта все споры погибли. Однако, и в контрольных образцах количество выживших спор этих грибов было невелико и в среднем составило 70, 14 и 2 КОЕ/г, соответственно. Таким образом, по-видимому, не только факторы космического полёта оказали негативное воздействие на споры грибов.

Обсуждение результатов

В нашей работе показана высокая жизнеспособность спор исследованных видов грибов после космического полёта на низкой околоземной орбите (НОО) как внутри спутника, так и в условиях открытого космоса. Таким образом, споры грибов способны сохранять жизнеспособность при воздействии целого комплекса стрессовых факторов, таких как пониженные значения температуры, радиация, сильная разреженность воздуха и т.д. Жизнеспособность спор варьировалась в зависимости от вида гриба.

Подавляющее большинство исследований с живыми организмами проводилось на НОО, характеризующейся высоким уровнем радиации, вакуумом и экстремальными температурами [2, 3, 5, 11]. Наше исследование также проходило на НОО.

У 3 из 13 видов (23%) все споры погибли. Из 10 выживших после полёта видов у 4 (40%) число жизнеспособных спор было намного больше после полёта внутри КА, чем снаружи. Кроме того, у 5 видов (38%) количество спор, выживших после полёта внутри спутника, статистически не отличалось от контрольных показателей. Это, возможно, объясняется более благоприятными для микромицетов условиями внутри спутника, чем в наружных контейнерах. Между тем, у 8 видов из 13 изученных (62%) после полёта внутри КА спор выжило меньше, чем в контроле. По-видимому, невысокие дозы радиации и магнитные поля могли повлиять на выживаемость спор. Действительно, известно, что флуктуации солнечной активности, радиации и магнитных полей влекли за собой количественные изменения в микрофлоре станции “МИР” [15], а сами микромицеты, выделенные со станции, меняли свою морфологию и физиологию [16].

Вакуум является одним из факторов, ставящих под сомнение возможность панспермии. Показано, что на НОО давление может понижаться до 10^{-7} Па. Благодаря эффекту дегидратации вакуум опасен для живых клеток. Липиды, углеводы, белки и нуклеиновые кислоты способны в условиях вакуума менять свою химическую структуру. Наиболее опасным для клеток является повреждение ДНК, которое может привести к мутациям и гибели [2]. Между тем, 1–2% спор бактерий выжили после инкубирования в течение 6 лет в космическом вакууме без какой-либо защиты от высыхания [4]. Есть сведения о том, что лишайники также выживают в вакууме, возможно, благодаря высокому уровню сахарных спиртов, стабилизирующих внутриклеточные макромолекулы при недостатке воды [5]. Что касается грибов, то *Cryomyces minteri* был способен формировать колонии после инкубирования в вакууме в течение 22 сут. Более того, 3,05% и 0,07% клеток *Cryomyces antarcticus* и *C. minteri*, соответственно, выжило после 1,5-летнего пребывания в открытом космосе (защита только от инсоляции) [3]. Споры *Aspergillus niger*, *A. versicolor*, *A. ochraceus* выжили после примерно 7-месячного [13, 17], а *Trichoderma longibrachiatum* — 2-летнего пребывания в условиях космического вакуума [14]. Также в литературе отмечено, что клетки, расположенные в несколько слоёв, намного лучше переносят вакуум, чем клетки, расположенные в один слой, возможно, благодаря значительному замедлению диффузии воды через несколько слоёв клеток [17]. Данные литературы согласуются с нашими: значительное количество спор исследованных нами грибов выжило в условиях сильной разреженности воздуха.

Ещё одним стрессовым и наиболее опасным для живых клеток фактором на НОО является ультрафиолетовое излучение [2–4, 18]. Оно оказывает сильное повреждающее воздействие на ДНК, в частности, способствует появлению двухцепочечных разрывов в молекулах ДНК, что может приводить к мутациям. Кроме того, на примере бактериальных клеток и спор, а также на примере спор гриба *Aspergillus ochraceus* было показано усиление негативного

влияния ультрафиолетового излучения в вакууме [13, 18]. Действительно, клетки *C. antarcticus* потеряли жизнеспособность после 1,5-летнего пребывания в открытом космосе под действием космического ультрафиолетового излучения и вакуума [3]. С другой стороны, есть предположение о том, что в вакууме все окислительные процессы в клетке должны тормозиться, смягчая таким образом негативное воздействие космических факторов, включая ультрафиолетовое излучение [3]. По данным литературы, лишайники выжили после 2-недельного пребывания в условиях “полноспектрального” ультрафиолетового излучения во время исследовательской программы EXPOSE. Кроме того, около 60% грибных клеток в талломе лишайников выжило после 16-дневного пребывания в открытом космосе без какой-либо защиты от УФ [5].

Доза поглощённого ультрафиолетового излучения спорами зависит от их расположения в образце. Так, в эксперименте “SPORES” было показано, что внешние слои спор гриба *Trichoderma longibrachiatum*, которые в космическом полёте располагались кластерами, защищали внутренние слои спор от УФ [14]. Похожая ситуация наблюдалась со спорами бактерий: верхние слои спор погибли, однако нижние слои выжили благодаря защитному верхнему слою из отмерших клеток [4]. В нашем исследовании верхние слои кварцевого песка со спорами могли служить защитой нижним слоям. Более того, пробирки с нашими образцами располагались во время полёта в три слоя, поэтому, скорее всего, образцы получали разные дозы облучения, что, в конечном итоге, привело к разнице в жизнеспособности спор из разных пробирок.

Ещё один неблагоприятный для живых организмов фактор на НОО — радиация, которая вызывается галактическими космическими лучами, солнечными космическими лучами и радиационным поясом Ван Аллена, являющимся результатом взаимодействия галактических и солнечных космических лучей с магнитным полем и атмосферой Земли [2]. По данным литературы, грибы не только легко приспосабливаются к высокому уровню радиации, но даже способны увеличивать скорость роста при повышенном радиационном фоне [10]. Так, грибы колонизировали стены разрушенного Чернобыльского атомного реактора [19]. Микобиота разрушенного четвёртого энергоблока Чернобыльской АЭС включала 37 видов из 19 родов [20]. Летальная доза гамма-излучения для микромицетов сильно зависит от видов грибов и выше для тёмно-, чем для светлоокрашенных видов. В нашем исследовании дозы радиации были в 10^4 раз ниже, чем стандартная доза для стерилизации пищевых продуктов в США (1 кГр [21]).

Из наших данных следует, что тёмноокрашенные виды были менее чувствительны к условиям открытого космоса, чем светлоокрашенные. Возможно, это различие связано с присутствием меланина в тёмноокрашенных видах грибов, который известен своими защитными свойствами от радиации [19]. По данным литературы, более 40% всех

изолированных из комнаты Чернобыльского реактора грибов, а также большое количество микроорганизмов, населяющих МКС, было пигментировано, что может указывать на протекторные функции пигментов [10, 20].

Наибольшую жизнеспособность в условиях открытого космоса продемонстрировал *Aspergillus versicolor*. Выживаемость большого количества спор *Aspergillus versicolor* в условиях космического полёта была предсказуемой, так как это пигментированный ксеротолерантный вид [22]. *A. versicolor* доминировал также на оборудовании станции “МИР” [12] и на поверхностях внутри МКС [23], он даже выжил после 7 мес. пребывания в открытом космосе на материалах космических аппаратов [10].

Aspergillus niger и *Penicillium chrysogenum* встречались на МКС [11, 23] и станции “МИР” [12] в больших количествах, поэтому эти виды должны хорошо переносить космический полёт внутри спутника. Это согласуется с нашими данными, большое число спор этих видов выжило внутри КА.

Cladosporium sphaerospermum был выделен из комнаты разрушенного четвёртого энергоблока Чернобыльской АЭС и демонстрировал статистически значимый направленный рост к источнику радиации ^{109}Cd [10]. В нашем исследовании споры этого вида гриба выжили после полёта как внутри, так и снаружи спутника, хотя и в небольшом количестве.

Заключение

Благодаря активному освоению космоса человеком возникла проблема защиты планет от назем-

ных микроорганизмов [2]. Выработана даже концепция защиты планет от контаминации, которая, например, предполагает строгие меры очистки космического оборудования при полётах на Марс [3]. В нашем исследовании тестируемые виды являлись широко распространёнными почвенными грибами, встречающимися повсеместно: в пыли, воздухе, де-структурированных материалах и т.д. Как следствие, именно они представляют в первую очередь риск для космоса.

Выжившие после полёта снаружи КА грибы принадлежат к разным таксономическим группам, имеют разные фенотипические признаки, в том числе, различную пигментацию. Не только тёмно-окрашенные грибы выжили, хотя защитная роль меланиновых пигментов известна. Возможно, могут быть реализованы другие механизмы устойчивости к стрессу, в частности, обильное образование слизи может защищать от повреждающего действия космических факторов.

Исходя из всего вышесказанного, микромицеты можно рассматривать как модель для изучения высокой устойчивости эукариотических организмов к стрессовым факторам, предел экологической пластичности которых крайне высок и даже выходит за границы этого показателя для земных местобитаний.

Авторы благодарят Шуршакова В.А. (Институт медико-биологических проблем РАН) за предоставленные данные радиометрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00029).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horneck G. Exobiological experiments in Earth orbit // Adv. Space Res. 1998. Vol. 22. N 3. P. 317–326.
2. Baglioni P., Sabbatini M., Horneck G. Astrobiology experiments in low Earth orbit: Facilities, instrumentation, and results // Complete course in astrobiology / Eds. G. Horneck and P. Rettberg. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. P. 273–319.
3. Onofri S., de la Torre R., de Vera J.P., Ott S., Zucconi L., Selbmann L., Scalzi G., Venkateswaran K.J., Rabbow E., Iñigo F.J.S., Horneck G. Survival of rock-colonizing organisms after 1.5 years in outer space // Astrobiology. 2012. Vol. 12. N 5. P. 508–516.
4. Horneck G., Bücker H., Reitz G. Long-term survival of bacterial spores in space // Adv. Space Res. 1994. Vol. 14. N 10. P. 41–45.
5. Sancho L.G., De la Torre R., Horneck G., Ascaso C., de los Rios A., Pintado A., Wierzchos J., Schuster M. Lichens survive in space: results from the 2005 LICHENS experiment // Astrobiology. 2007. Vol. 7. N 3. P. 443–454.
6. Williams J.P., Hallsworth J.E. Limits of life in hostile environments: no barriers to biosphere function? // Environ. Microbiol. 2009. Vol. 11. N 12. P. 3292–3308.
7. Scott J.A., Forsyth T.J. Thermophilic microorganisms in aircraft fuel // Int. Biodeteriorat. Bull. 1976. Vol. 12. N 1. P. 1–4.
8. Билай В.И., Коваль Е.З. Рост грибов на углеводородах нефти. Киев: Наук. Думка, 1980. 340 с.
9. Васильева А.А., Чекунова Л.Н., Полякова А.В. Влияние температуры на рост и жизнеспособность Нор-

moconis resiniae и *Phialophora* sp., развивающихся в авиационном топливе // Микол. фитопатол. 2009. Т. 43. № 4. С. 312–316.

10. Dadachova E., Casadevall A. Ionizing radiation: how fungi cope, adapt, and exploit with the help of melanin // Curr. Opin. Microbiol. 2008. Vol. 11. N 6. P. 525–531.

11. Novikova N., De Boever P., Poddubko S., Deshevaya E., Polikarpov N., Rakova N., Coninx I., Mergeay M. Survey of environmental biocontamination on board the International Space Station // Res. Microbiol. 2006. Vol. 157. N 1. P. 5–12.

12. Геворкян С.А., Кураков А.В., Новикова Н.Д., Гогинян В.Б. Распространение оппортунистических грибов в микробиоте биоповреждений полимеров космической техники // Успехи медицинской микологии / Под ред. Ю.В. Сергеева. М.: Национальная академия микологии, 2005. С. 58–60.

13. Dose K., Bieger-Dose A., Dillmann R., Gill M., Kerz O., Klein A., Stridde C. UV photobiochemistry under space conditions // Adv. Space Res. 1996. Vol. 18. N 12. P. 51–60.

14. Neuberger K., Lux-Endrich A., Panitz C., Horneck G. Survival of spores of *Trichoderma longibrachiatum* in Space: data from the space experiment SPORES on EXPOSE-R // Int. J. Astrobiol. 2015. Vol. 14. N 1. P. 129–135.

15. Новикова Н.Д. Основные закономерности формирования микрофлоры среды обитания орбитального комплекса “МИР” // Авиакосм. экол. мед. 2001. Т. 35. № 4. С. 32–40.

16. Викторов А.Н., Новикова Н.Д., Дешева Е.А., Поликарпов Н.А., Поддубко С.В., Брагина М.П. Сравни-

тельная оценка биологических свойств микроорганизмов, выделенных в орбитальном комплексе “МИР” в различные сроки эксплуатации // *Авиакосм. и экол. мед.* 1998. Т. 32. № 2. С. 61–68.

17. Dose K., Bieger-Dose A., Dillmann R., Gill M., Kerz O., Klein A., Meinert H., Nawroth T., Risi S., Stridde C. ERA-experiment “space biochemistry” // *Adv. Space Res.* 1995. Vol. 16. N 8. P. 119–129.

18. Horneck G. European activities in exobiology in Earth orbit: results and perspectives // *Adv. Space Res.* 1999. Vol. 23. N 2. P. 381–386.

19. Dighton J., Tugay T., Zhdanova N. Fungi and ionizing radiation from radionuclides // *FEMS Microbiol. Lett.* 2008. N 281. P. 109–120.

20. Zhdanova N.N., Zakharchenko V.A., Vember V.V., Nakonechnaya L.T. Fungi from Chernobyl: mycobiota of the

innerregions of the containment structures of the damaged nuclearreactor // *Mycol. Res.* 2000. N 104. P. 1421–1426.

21. Saleh Y.G., Mayo M.S., Ahearn D.G. Resistance of some common fungi to gamma irradiation // *Appl. Environ. Microb.* 1988. Vol. 54. N 8. P. 2134–2135.

22. Ребрикова Н.Л. Биология в реставрации. М.: Государственный научно-исследовательский институт реставрации, 1999. 183 с.

23. Алехова Т.А., Александрова А.В., Загустина Н.А., Новожилова Т.Ю., Романов С.Ю. Микроскопические грибы на российском сегменте Международной космической станции // *Микол. фитопатол.* 2009. Т. 43. № 5. С. 9–19.

Поступила в редакцию

06.10.2016

Принята в печать

02.12.2016

MYCOLOGY AND ALGOLOGY

THE SURVIVAL OF MICROMYCETES EXPOSED TO SPACE CONDITIONS

V.B. Ponizovskaya^{1,*}, M.Yu. Dyakov¹, A.B. Antropova², E.N. Bilanenko¹, V.L. Mokeeva¹, V.K. Ilyin³

¹ Department of Mycology and Algology, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory 1-12, Moscow, 119234, Russia;

² Mechnikov Research Institute for Vaccines and Sera, Mal. Kazennyi per. 5A, Moscow, 105064, Russia;

³ Institute of Biomedical Problems, Khoroshevskoe shosse 76A, Moscow, 123007 Russia

*e-mail: v.ponizovskaya@gmail.com

Original data on the survival of fungal spores exposed to space conditions are presented. The experiment was carried out on the Earth-orbiting Russian satellite Foton-M4. The flight duration of the satellite was 45 days. Thirteen fungal species (hyaline as well as pigmented) from 10 genera recovered from destructed stone materials were studied. Sterile quartz sand was inoculated by the fungal spores and was placed into Eppendorf tubes. During the space flight, the Eppendorf tubes with fungal spores were kept inside the Foton descent capsule in the “Biokont” containers and on the external surface of the capsule in the “Exobiofrost” containers exposed to the open space as well. Spores of ten species (77% of all tested species), i.e. *Acremonium charticola*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus versicolor*, *Chaetomium globosum*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium verrucosum*, *Purpureocillium lilacinum*, *Sarocladium kiliense*, and *Trichoderma harzianum*, survived after the flight both inside and outside the descent capsule. Only three species (23% of all tested species), i.e. *Acremonium furcatum*, *Engyodontium album* and *Verticillium zaregamsianum*, failed to survive outside as well as inside the capsule. Spore viability differed depending on the fungal species. Thus, spores of some fungal species are able to survive under the complex of stress factors such as low temperature values, radiation, etc. We have shown that micromycetes can be used as a model group for study of eukaryotic organisms' resistance to stress factors, due to their high tolerance not only to extreme terrestrial environments, but to the extraterrestrial ones as well.

Keywords: exobiology, Foton-M4, space flight, space conditions, fungi, micromycetes, survival.

Сведения об авторах

Понизовская Валерия Борисовна — аспирант кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-54-82; e-mail: v.ponizovskaya@gmail.com

Дьяков Максим Юрьевич — инженер кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-54-82; e-mail: max_fungi@mail.ru

Антропова Анна Борисовна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории экологической биотехнологии ФГБУ НИИ вакцин и сывороток им. И.И.Мечникова. Тел.: 8-495-917-42-55; e-mail: antropova-a@yandex.ru

Биланенко Елена Николаевна — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-54-82; e-mail: e_bilanenko@mail.ru

Мокеева Вера Леонидовна — канд. биол. наук, науч. сотр. кафедры микологии и альгологии биологического факультета МГУ. Тел.: 8-495-939-54-82; e-mail: veramokeeva@mail.ru

Ильин Вячеслав Константинович — докт. мед. наук, проф., зав. отделом санитарно-гигиенической безопасности человека в искусственной среде обитания Института медико-биологических проблем. Тел.: 8-499-195-15-00; e-mail: ilyin@imbpr.ru