

УДК 561.28:544.772

Исследование динамики накопления аэрозолей и спор микроскопических грибов в воздушной среде герметичного обитаемого объекта в условиях четырехмесячного изоляционного эксперимента SIRIUS-19

© 2020 П.А. АЛЕКСАНДРОВ¹, А.В. АЛЕКСАНДРОВА², Е.А. АНТОНОВ¹, В.К. ИЛЬИН³, В.И. КАЛЕЧИЦ^{1*}, И.Е. КОВБАСЮК¹, Е.А. ЛАЩЕНОВА¹, О.Ю. МАСЛАКОВ¹, Е.С. ПРИТЧИНА¹, Н.А. УСАНОВА³, Е.С. ХОЗЯШЕВА¹, М.Н. ШАХОВ¹

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123182

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991

³ Государственный научный центр Российской Федерации Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, 123007

*e-mail: Kalechits_VI@nrcki.ru, vik@clri.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 02.10.2020 г.

Принята к публикации 15.11.2020 г.

В ходе четырехмесячного изоляционного эксперимента SIRIUS-19, воспроизводящего основные временные характеристики реального космического полета на Луну в наземном медико-техническом комплексе, была отработана методика непрерывного контроля содержания аэрозолей в воздушной среде герметичного обитаемого объекта с помощью счетчика аэрозолей Handheld 3016 (США). Параллельно с автоматическим счетом частиц, шесть раз была проведена оценка количества жизнеспособных пропагул и видового состава микроскопических грибов методом посева. Результаты, полученные двумя методами, сопоставлены: выявлены закономерности изменения концентрации нейтральных частиц и спор микромицетов и их связь с деятельностью экипажа; проанализирована возможность использования счетчика частиц в космическом корабле как индикатора микробиологической обстановки с учетом фоновой концентрации аэрозолей. Выявлена общая тенденция накопления спор грибов в воздушной среде обследуемых помещений от 2–5 в начале, до 287 ± 36 КОЕ/м³ ближе к завершению изоляционного эксперимента, однако это значение не превысило санитарную норму, рекомендованную ВОЗ. Присутствовали потенциально опасные для здоровья виды: *Aspergillus fumigatus*, *A. niger*, *A. sydowii*, но их споровая нагрузка крайне мала.

Ключевые слова: воздушная среда, космические станции, микробиологические загрязнения, счетчик частиц аэрозолей.

doi: 10.21519/0234-2758-2020-36-6-138-148

Известно, что в воздушной среде любого замкнутого помещения накопление микрозагрязнений происходит с большей скоростью, чем в помещениях с организованным воздухообменом и системой воздухоочистки (за счет застойных зон и генерации аэрозолей внутри) [1, 2]. Из всего

множества замкнутых объектов выделяется особая группа — полностью герметичные обитаемые помещения, у которых отсутствует контакт с атмосферой, но есть система воздухоподготовки для поддержания жизнедеятельности находящихся внутри людей. Наиболее типичными

Список сокращений: РМ X — particulate matter — масса всех частиц с размером менее X мкм; RH — relative humidity — относительная влажность воздуха; ТРМ — total particulate matter — масса всех измеренных частиц.

примерами таких объектов являются разного рода убежища, подводные лодки, самолеты и космические станции [3].

Особенностью этой группы помещений является то, что, с одной стороны, при отсутствии человека их система воздухоподготовки, как правило, обеспечивает высокую степень очистки воздуха на уровне классов чистоты ИСО 7 — ИСО 9 [4], но, с другой стороны, присутствие людей и их деятельность приводят к быстрому накоплению в воздухе загрязнений вплоть до опасного для здоровья уровня [1, 2]. Контроль за динамикой накопления загрязнений, в частности, частиц аэрозолей, важен как с точки зрения гигиены и охраны здоровья находящихся в помещении людей, так и с точки зрения отслеживания роста концентрации частиц техногенного происхождения, так как такое явление служит индикатором нештатной ситуации вплоть до аварийной [5, 6].

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Институт медико-биологических проблем РАН (ИМБП РАН) совместно с национальным аэрокосмическим агентством НАСА (США) проводит серию наземных изоляционных экспериментов SIRIUS (Scientific International Research In Unique terrestrial Station). Второй этап (120-суточный) был проведен 19.03–19.07.2019 г. в медико-технологическом наземном экспериментальном комплексе (НЭК), имитирующем пребывание на космическом корабле. В течение этого периода были воспроизведены основные характеристики реального космического полета на Луну: перелет до спутника с последующим облетом для поиска места приземления, выход четырех членов экипажа и проведение операций на поверхности, возвращение на Землю. Главной целью эксперимента являлось изучение механизмов адаптации организма человека к условиям 120-суточной изоляции в герметичном объекте с искусственной средой обитания, имитирующей космический полёт. Во время эксперимента даже использовали пятиминутную задержку связи с экипажем, аналогичную задержке при реальном полете на Луну. Научная программа эксперимента включала 79 подпрограмм исследований по физиологии, психологии, микробиологии, а также по технологическим аспектам пребывания в герметичном объекте.

Цель исследования

Одна из подпрограмм была разработана НИЦ «Курчатовский институт» совместно с биологическим факультетом МГУ и направлена на исследование динамики накопления аэрозолей

в воздушной среде герметичных обитаемых объектов в условиях длительной изоляции. Целью исследования стала оценка применимости метода определения уровня аэрозольного загрязнения воздуха в герметичном объекте с помощью счетчиков частиц аэрозолей, отработанных в технологии чистых производственных помещений, и сопоставление результатов измерения с результатами микробиологического анализа. Тем самым оценивали возможность использования счетчика частиц в космическом корабле в качестве индикатора микробиологической обстановки (без необходимости выделения микроорганизмов), в частности, возможность регистрации спор грибов в воздушной среде обитаемого герметичного объема с учетом фоновой концентрации аэрозолей. Также целью работы был поиск корреляций между спектром размеров аэрозолей и различными техногенными процессами (например, в момент проведения экипажем различных технических операций).

Международная команда (экипаж) SIRIUS-19 состояла из 6 человек — трех мужчин и трех женщин, изолированных от внешнего мира. В ходе эксперимента экипаж выполнял задачи ежедневного медицинского контроля и оценки состояния здоровья, контроля двигательной активности и проведения регулярных физических тренировок. Осуществление научных экспериментов было распределено между членами экипажа.

Методика проведения измерений

Медико-технологический наземный экспериментальный комплекс ИМБП, имитирующий космический корабль, представляет собой три жилых цилиндрических модуля, разбитых, в свою очередь, на несколько помещений — комната отдыха («гостиная»), кухня-столовая, тренажерный зал, оранжерея, личные каюты, склад. Для регулярного контроля уровня запыленности и микробиологического состояния были выбраны три помещения основной деятельности экипажа — комната отдыха, тренажерный зал и оранжерея, замеры в которых проводились поочередно.

Измерения уровня запыленности выполняли с помощью ручного счетчика аэрозолей Handheld 3016 IAQ производства Lighthouse (США) в течение всего эксперимента, точнее, с 23.03 по 14.07 с небольшим техническим перерывом в апреле (14–18.04), вызванного заменой кабеля связи прибора и компьютера.

Счетчик программировали один раз в сут таким образом, чтобы замеры проходили автоматически каждые 15 мин в течение 24 ч, и стационарно устанавливали в контролируемом помещении. При каждом измерении длительностью 1 мин прибор

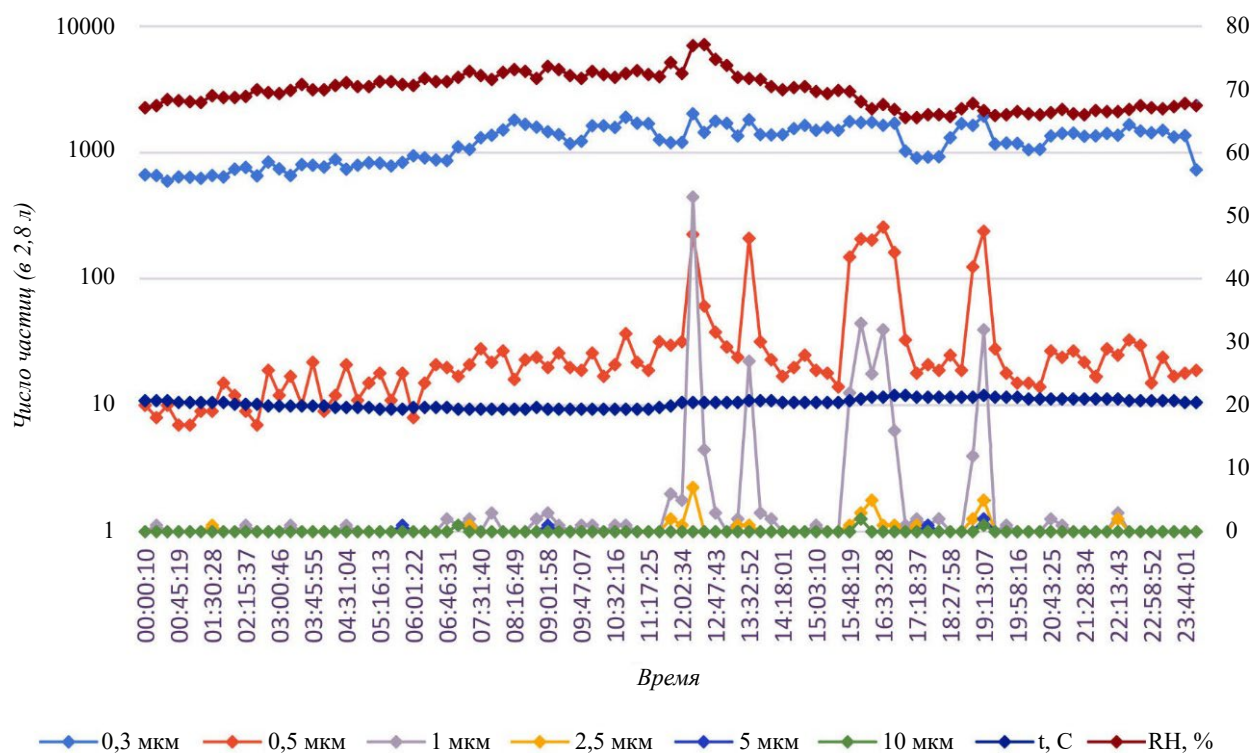


Рис. 1. Изменение числа частиц различного диаметра в тренажерном зале в течение сут 1 июня 2019 г. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат слева — число частиц, справа — температура и величина RH.

Fig. 1. Variation in the number of different size particles in the training gym during the day on June 1, 2019. At the x-axis is the current time, y-axis on the left side is the number of particles in cubic foot, on the right side — the temperature and RH.

отбирал пробу в 2,8 л. При этом проба разбавлялась в 10 раз чистым воздухом, пришедшим через «абсолютный» (мембранный) воздушный фильтр.

Измеряли счетную концентрацию аэрозольных частиц размером 0,3 / 0,5 / 1 / 2,5 / 5 / 10 мкм. По результатам измерений прибор вычислял значения PM_{0,5}; 1; 2,5; 5; 10 и TSP. Одновременно со счетной концентрацией частиц наружным зондом прибора Handheld 3016 IAQ измеряли температуру и относительную влажность воздуха.

Анализ количества и видового состава спор микроскопических грибов проводили 7 раз — один раз до старта в еще не населенном модуле НЭК и 6 раз в течение эксперимента в трех различных помещениях модуля. Для этого использовали микробиологический импактор «Аспиратор ПУ-01Б» (ООО «Химко», Россия). При отборе пробы через пробоотборник с чашкой Петри, заполненной плотной питательной средой суло-агар, прокачивали 500 л (5 повторностей) или 1000 л воздуха (также 5 повторностей). Пробы после инкубации чашек анализировали в лабораторных условиях. Проводили подсчет колониеобразующих единиц (КОЕ) на м³ воздуха помещения, выделение чистых культур всех морфологических типов колоний микромицетов и их видовую идентификацию.

Во время пробоотбора рядом с микробиологическим аспиратором устанавливали счетчик аэрозольных частиц, причем его переключали на работу в практически непрерывном режиме (1 измерение в мин в течение 1 ч). Это делали для более корректного сопоставления результатов измерения счетчиком с результатами микробиологического анализа [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На протяжении всего эксперимента была выявлена связь концентрации частиц с активной деятельностью экипажа. Менее четко эта связь прослеживается при мониторинге комнаты отдыха, поскольку в ней часто находилось от одного до шести человек, и колебания концентрации аэрозольных частиц при изменении численности в значительной степени сглаживались. В целом же концентрация частиц в комнате отдыха менялась в течение дня в широких пределах — от несоответствия гигиеническим нормам ВОЗ (см. ниже) до классов чистоты ИСО 7 и 8 в ночные часы ($3,52 \cdot 10^5$ и $3,52 \cdot 10^6$ м³ для частиц 0,5 мкм соответственно) [4].

В тренажерном зале резкое повышение концентрации частиц во всех размерных диапазонах фиксировалось очень четко (см. рис. 1), тем более

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАКОПЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

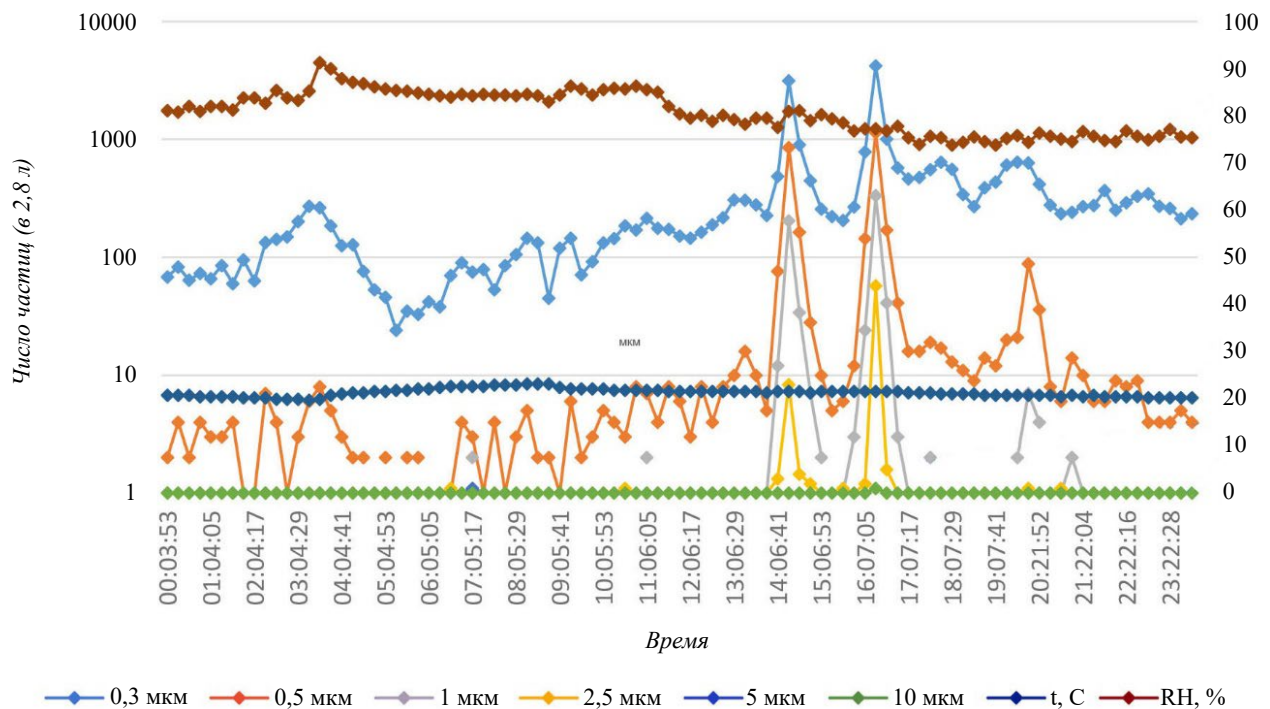


Рис. 2. Изменение числа частиц различного диаметра в оранжерее в течение сут 14 мая 2019 г. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат слева — число частиц, справа — температура и RH.

Fig. 2. Variation in the number of different size particles in the greenhouse during the day on 14th of May 14, 2019. At the x-axis is the current time, y-axis on the left side is the number of particles in cubic foot, on the right side — the temperature and RH.

что пребывание членов экипажа (не более двух одновременно) в этом помещении всегда сопровождалось активными физическими действиями. Следует отметить, что в отсутствие людей чистота воздуха в тренажерном зале соответствовала классу чистоты ИСО 7.

Также отчетливо по резкому (на порядок и более) повышению концентрации частиц во всех размерных диапазонах регистрировали появление членов экипажа в оранжерее (рис. 2), где в отсутствие людей концентрации частиц были невысоки (соответствовали классу чистоты ИСО 7).

Следует отметить очень высокую относительную влажность воздуха практически в течение всего эксперимента, причем величина влажности нарастала с длительностью пребывания экипажа в модуле. Это относится именно к жилым помещениям (к комнате отдыха и тренажерному залу; для оранжереи повышенная влажность является нормой).

Так, в марте относительная влажность в помещениях росла с 40–45% до 60%; в апреле держалась около 60%, в мае выросла до 70–80%, снизившись до 50–60% лишь к концу мая. В июне относительная влажность колебалась в районе 60% (в оранжерее 85–87%), но в конце месяца отмечены очень высокие значения влажности как в комнате отдыха и тренажерном зале (85–90%), так и в оранжерее

(до 100%) (рис. 3). Такие величины относительной влажности, вероятно, связаны с погодными условиями в Москве (в конце июня 2019 г. температура воздуха снизилась до 10 °С при влажности до 90%).

Другими словами, значения относительной влажности в помещениях почти всегда превышали как рекомендации ГОСТ Р 30494-96 для теплого времени года (30–45%, max 60%), так и значения физиологической нормы (40–60%).

В целом уровень запыленности в изолированном герметичном модуле во время эксперимента SIRIUS-19 следует характеризовать как значительный.

Счетчик аэрозольных частиц Handheld 3016 IAQ не только измеряет количество частиц в шести размерных диапазонах, но и рассчитывает значение PM_{0,5}; 1; 2,5; 5; 10 и TPM.

Особое внимание при анализе чистоты воздуха в последнее время вызывают значения показателя PM_{2,5}, поскольку именно эта величина соответствует размерам аэрозольных частиц, способных преодолеть аэрогематический барьер, т. е. попадать в кровь. Величина PM_{2,5} в воздухе регламентируется национальными законодательными актами, Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) [8, 9], а также «ГН 2.1.6.1338–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

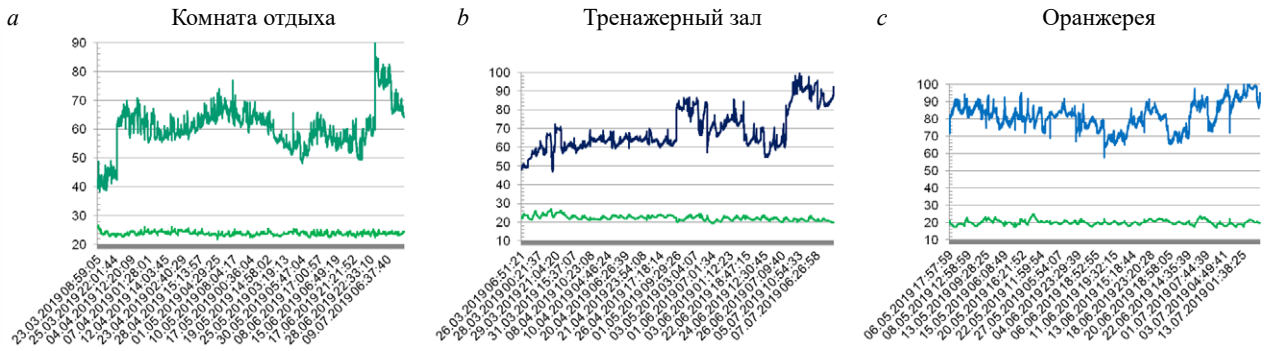


Рис. 3. Изменение RH (верхняя кривая) и температуры в градусах Цельсия (нижняя кривая) в помещениях комнаты отдыха (а), тренажерного зала (б) и оранжереи (в) на протяжении всего эксперимента.

Fig. 3. The dependence of RH (upper curve) and temperature in degrees Celsius (lower curve) from time in the recreation room (a), gym (b), and greenhouse (c) throughout the experiment.



Рис. 4. Изменение RH (верхняя кривая красного цвета), температуры в градусах Цельсия (нижняя кривая светло-зеленого цвета) и значения PM 2,5 в мкг/м³ (ломаная кривая бирюзового цвета) в комнате отдыха в период с 23.03 по 05.04.2019 г.

Fig. 4. The dependence of RH (upper red curve), temperature in degrees Celsius (lower light green curve) and PM 2.5 in mcg/m³ (broken turquoise curve) in the recreation room during the period from 23.03 to 05.04.2019.

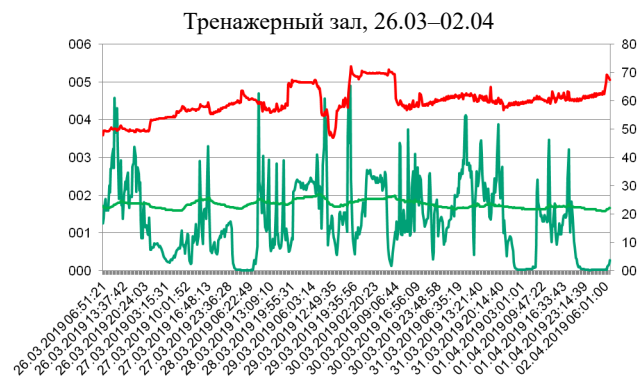


Рис. 5. Изменение RH (верхняя кривая красного цвета), температуры в градусах Цельсия (светло-зеленого цвета) и значения PM 2,5 в мкг/м³ (ломаная кривая бирюзового цвета) в помещении тренажерного зала в период с 26.03 по 02.04.2019 г.

Fig. 5. The dependence of RH as a percentage (upper red curve), temperature in degrees Celsius (lower light green curve) and PM 2.5 in mcg/m³ (broken turquoise curve) in the gym during the period from 23.03 to 02.04.2019.

населенных мест. Гигиенические нормативы», утв. 21.05.2003.

На фоне высокой влажности особенно четко проявляются эффекты влияния ее изменения на счетную и массовую (PM 2,5) концентрацию частиц, что иллюстрируется графиками мониторинга PM 2,5 и влажности на рис. 4 и 5. С ростом влажности концентрация частиц увеличивается и наоборот, причем колебания счетной концентрации повторяют колебания значений влажности в значительно большем масштабе. По-видимому, это явление связано с укрупнением/разукрупнением частиц в водяных парах.

В процессе измерений неоднократно фиксировали значительное (в разы) превышение максимальной разовой концентрации частиц PM 2,5 (160 мкг/м³). Например, в марте в комнате отдыха

в присутствии членов экипажа максимальная разовая концентрация частиц PM 2,5 была повышена практически всегда, но она ни разу не превышала предел ночью. То же относится и к тренировочному залу. Следует отметить, что основной вклад в величину PM 2,5 давали частицы субмикронного размера (диаметром менее 1 мкм).

Среднесуточные максимальные значения PM 2,5 по российским гигиеническим нормативам ГН 2.1.6.1338-03 (35 мкг/м³), как правило, не превышались. Среднесуточные максимальные значения PM 2,5 по нормативам ВОЗ (25 мкг/м³) в некоторых случаях были превышены.

Из изложенного выше можно сделать вывод, что система очистки воздуха отлично работала в отсутствие людей, но хуже справлялась при их появлении. Доработка системы очистки

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ НАКОПЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

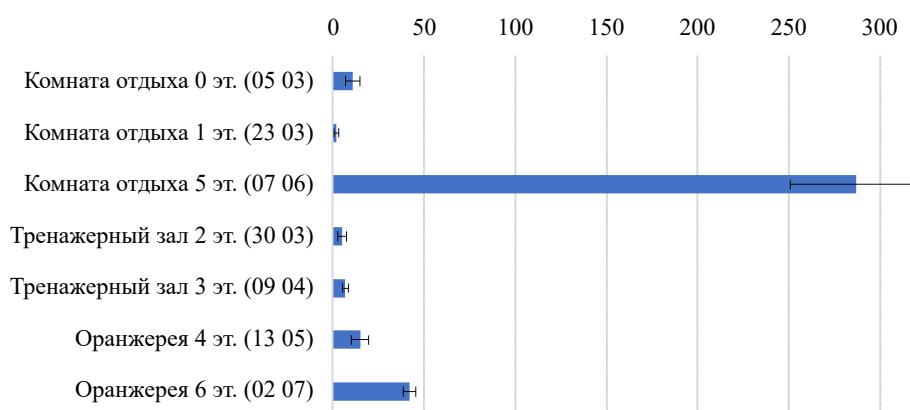


Рис. 6. Содержание жизнеспособных пропагул микроскопических грибов (КОЕ/м³), зафиксированное в воздушной среде обследуемых помещений в ходе изоляционного эксперимента SIRIUS-19.

Fig. 6. Diagram of the content of propagules of microscopic fungi (CFU / m³) recorded in the examined rooms during the SIRIUS-19 isolation experiment.

воздуха герметичного модуля и снижение относительной влажности является одной из основных рекомендаций для будущих запланированных экспериментов SIRIUS.

Оценка состава и количества жизнеспособных частиц биологического компонента аэрозолей

Оценку видового состава и количества жизнеспособных колониеобразующих единиц (КОЕ) микроскопических грибов проводили методом микробиологического посева на твердые питательные среды с помощью импактора «Аспиратор ПУ-01Б». Во время нахождения экипажа внутри модуля НЭК микробиологический анализ в каждом из контролируемых помещений проводили дважды:

- 23.03 и 07.06 — в комнате отдыха, где обычно проходил общий сбор экипажа («гостиная»);
- 30.03 и 09.04 — в тренажерном зале;
- 13.05 и 02.07 — в оранжерее.

Для выделения микромицетов были использованы стандартные питательные среды для грибов Чапека и Мальт-агар [10] с добавлением антибиотика, позволяющие выявить максимальное разнообразие культивируемых микромицетов и легко дифференцировать морфотипы колоний. Засеянные чашки Петри инкубировали в термостате при 25 °С, выросшие колонии подсчитывали на 7–10 сутки. Выделяли чистые культуры всех морфологических вариантов. Изоляты инкубировали в термостате при 25 °С в течение 5–10 сут, в зависимости от скорости роста и степени развития спороношения, у исследуемых культур описывали морфологию колоний и микроскопические признаки с использованием микроскопа МИКМЕД — 1 («Ломо», Россия). Идентификацию проводили по культуральным и микроморфологическим критериям, используя современные руководства [11–15].

Наименования видов выверены по базам данных MycoBank Fungal databases (<http://www.mycobank.org>) и IndexFungorum CABI Bioscience Databases (<http://www.indexfungorum.org>).

Дрожжеподобные грибы и бактерии в пяти замерах выявлены не были, а в двух случаях выделены без идентифицирования, т. к. в эксперименте применяли методы, оптимизированные для выявления именно мицелиальных грибов.

Предварительный анализ воздушной среды в медико-техническом наземном экспериментальном комплексе провели до начала изоляционного эксперимента (05.03) в комнате отдыха. В результате измерений отмечен низкий уровень содержания пропагул микроскопических грибов, в среднем $11 \pm 4,1$ (стандартное отклонение) КОЕ на 1 м³ (табл. 1 и рис. 6). Непосредственно перед заселением экипажа в модуле провели санитарную обработку, в связи с чем первые два этапа, проведенные в первые недели после начала эксперимента, заспоренность была очень низкой: $2 \pm 1,3$ и $5 \pm 2,4$ КОЕ на 1 м³, соответственно. В ходе «полета» она постепенно росла и к середине срока пребывания, на 3–4 этапах, достигла показателя, сравнимого с состоянием до санитарной обработки — 7–15 КОЕ/м³. В дальнейшем наблюдали более сильный рост числа КОЕ в воздушной среде, особенно в комнате отдыха, до 287 ± 36 КОЕ/м³, однако санитарная норма в 500 КОЕ/м³, приведенная в рекомендациях ВОЗ для жилых и рабочих помещений [16], превышена не была.

Состав выявленных микроскопических грибов был типичен для городских помещений. Всего отмечено 29 видов, наиболее разнообразны представители рода *Aspergillus* — 9 видов, далее следует род *Penicillium* — 8 и род *Talaromyces* — 4. Все эти микромицеты относятся к группе технофилов и приспособлены к росту на разнообразных субстратах

Содержание жизнеспособных пропагул (КОЕ) на 1 м³ воздуха, видовой состав и относительное обилие (%) микроскопических грибов в воздушной среде трех помещений медико-технологического наземного экспериментального комплекса в ходе эксперимента SIRIUS-19 (март — июль 2019 г.)

The content of viable propagules (CFU / m³), species composition and relative abundance (%) of microscopic fungi in the air of three rooms in the medical and technological ground-based test facility during the SIRIUS-19 isolation experiment (March-July 2019).

Срок и место отбора проб Виды микроскопических грибов	0-й этап	1-й этап	5-й этап	2-й этап	3-й этап	4-й этап	6-й этап
	05 03	23 03	07 06	30 03	09 04	13 05	02 07
	Комната отдыха			Тренажерный зал		Оранжерея	
Содержание спор КОЕ/м ³	11±4,1	2±1,3	287±36	5±2,4	7±1,8	15±4,9	42±3,5
Количество выявленных видов	10	9	4	9	10	11	9
<i>Aphanocladium album</i> (Preuss) W. Gams						3	
<i>Aspergillus candidus</i> Link	3,6						
<i>A. clavatus</i> Desm.				2,6			
<i>A. foetidus</i> Thom et Raper	3,6						
<i>A. fumigatus</i> Fresen.		7,1					
<i>A. glaucus</i> (L.) Link		28,6			63,9		
<i>A. niger</i> Tiegh.	14,3	14,3		2,6		2	0,6
<i>A. ochraceus</i> G. Wilh.					0,7	1	0,6
<i>A. sydowii</i> (Bainier et Sartory) Thom et Church	50	14,3	9,2			11,9	1,8
<i>A. ustus</i> (Bainier) Thom et Church					0,7	7,9	
<i>Chaetomium globosum</i> Kunze	10,7						
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries	3,6		2,3				
<i>C. herbarum</i> (Pers.) Link		7,1					
<i>Mucor plumbeus</i> Bonord.	3,6						
<i>Penicillium aurantiogriseum</i> Dierckx		7,1		28,9	3,5	41,6	
<i>P. brevicompactum</i> Dierckx					12,5		
<i>P. chrysogenum</i> Thom	3,6	7,1	11,7	21,1	5,6	18,8	1,8
<i>P. citrinum</i> Thom						3	11,8
<i>P. miczynskii</i> K.W. Zaleski		7,1			1,4	4	
<i>P. olsonii</i> Bainier et Sartory							70,9
<i>P. solitum</i> Westling					9	5,9	
<i>P. spinulosum</i> Thom	3,6			2,6			2,7
<i>Rhizopus stolonifer</i> (Ehrenb.) Vuill.	3,6	7,1					
<i>Talaromyces aeruginus</i> (Samson) N. Yilmaz, Frisvad et Samson				2,6	0,7		
<i>T. amestolkiae</i> N. Yilmaz, Houbraeken, Frisvad et Samson							8,8
<i>T. verruculosus</i> (Peyronel) Samson, N. Yilmaz, Frisvad & Seifert				2,6			
<i>T. ruber</i> (Stoll) N. Yilmaz, Houbraeken, Frisvad et Samson			76,8	10,5	2,1		
<i>Trichoderma asperellum</i> Samuels, Lieckf. et Nirenberg						1	
Дрожжи				26,3			0,9

внутри помещений в условиях недостатка питания и низкой влажности. Они могут вызывать биоповреждения. Некоторые виды потенциально опасны для здоровья экипажа (аллергенные и условно патогенные грибы: *Aspergillus fumigatus*, *A. niger*, *A. sydowii*), но их споровая нагрузка была крайне мала.

Замеры с помощью микробиологического пробоотбора в самом «населенном» помещении — комнате отдыха — проведены в начале эксперимента и перед его окончанием, что позволило оценить степень накопления спор грибов в течение всего эксперимента в месте, наиболее критическом, с точки зрения скопления людей. Результаты оценки состава и количества жизнеспособных частиц в комнате отдыха представлены в табл. 1 и на рис. 6. Зафиксирован значительный (на два порядка) рост количества КОЕ грибов (в одинаковых объемах воздуха) от начала эксперимента к его окончанию. Резкий прирост до 287 КОЕ/м³ произошел только за счет увеличения концентрации спор одного вида — *Talaromyces ruber*, следовательно, можно предположить, что в помещении образовался скрытый очаг его развития.

Проведенные одновременно измерения концентрации аэрозольных частиц с помощью счетчика также зарегистрировали рост концентрации крупных (≥ 5 мкм; ≥ 10 мкм) частиц примерно на порядок; при этом доля крупных частиц в общем их количестве также выросла в несколько раз (примерно в 5 раз).

Следует заметить, что, согласно микробиологическому анализу, проведенному 07.06, основной вклад в повышение концентрации спор грибов с размерами конидий 2,5–3,5 \times 1,5–2 мкм пришелся на вид *Talaromyces ruber* (табл. 1), что хорошо согласуется с данными, полученными счетчиком аэрозолей.

Отметим, что сравнение результатов было в значительной степени затруднено различием методик, объемов проанализированного воздуха и условий среды. В дальнейшем для последующих экспериментов SIRIUS параметры измерений описанными методами будут максимально унифицированы.

Замеры методом микробиологического пробоотбора в тренажерном зале, проведенные с небольшим разрывом (30.03 и 09.04), также отметили рост общего количества грибов (см. табл. 1 и рис. 6). Аналогичные результаты (рост на порядок количества частиц ≥ 10 мкм и примерно на два порядка количества частиц ≥ 5 мкм) зафиксированы и счетчиком аэрозолей.

В тренажерном зале основной рост концентрации грибов с размерами спор 4–5 мкм по данным микробиологического анализа пришелся на вид

Aspergillus glaucus, что хорошо согласуется с данными, полученными с помощью счетчика аэрозолей.

Микробиологические замеры в оранжерее, выполненные с разрывом почти в два месяца (13.05 и 02.07), зафиксировали рост количества грибов в 3–5 раз (табл. 1 и рис. 6). Размер спор вида *Penicillium olsoni*, внесших наибольший вклад в последние измерения, составляет 3–4 \times 2,5–3 мкм, что согласуется с ростом концентрации крупных частиц, зарегистрированным счетчиком аэрозолей.

О возможности оценки природы регистрируемых счетчиком аэрозолей частиц

Корреляция между общим количеством регистрируемых счетчиком аэрозолей частиц и количеством жизнеспособных пропагул микроорганизмов установлена довольно давно и продолжает служить объектом исследований [17–20], однако эти сведения носят обобщенный характер. Но можно ли сделать какие-либо выводы о доле жизнеспособных частиц при конкретных текущих измерениях?

Результаты наших исследований позволяют сделать осторожный предварительный вывод, что подобный анализ возможен на основе оценки результатов мониторинга количества частиц с учетом всех размерных диапазонов.

Рассмотрим, например, кривые мониторинга аэрозолей, содержащие пиковые увеличения концентрации частиц (условно назовем это событием). В нашем случае чаще всего события происходили при появлении в помещении людей, и проще всего эти события можно идентифицировать в тренажерном зале (в комнате отдыха из-за большого количества людей эффекты смазаны, а в оранжерее наоборот — люди появлялись редко и ненадолго). Анализ позволяет охарактеризовать несколько типов событий:

1 тип. Характерная для этого типа событий картина — рост концентрации частиц в диапазоне размеров до 5 мкм и отсутствие роста для частиц с размерами ≥ 5 мкм и ≥ 10 мкм. Примером могут являться результаты мониторинга 01.04 (см. рис. 7): рост концентрации частиц в диапазоне до 5 мкм (особенно заметен по частицам 2,5 мкм — рост на 2 порядка), но при этом роста концентрация частиц размером ≥ 5 мкм и ≥ 10 мкм практически нет. Аналогичные картины регистрировались и в некоторые другие дни.

2 тип. Типичная картина — рост концентрации частиц во всех диапазонах, включая частицы ≥ 5 мкм и ≥ 10 мкм. Такого рода события регистрировались часто.

3 тип. Наблюдается рост концентрации частиц размером более ≥ 5 мкм и ≥ 10 мкм при отсутствии заметного роста числа частиц с размерами

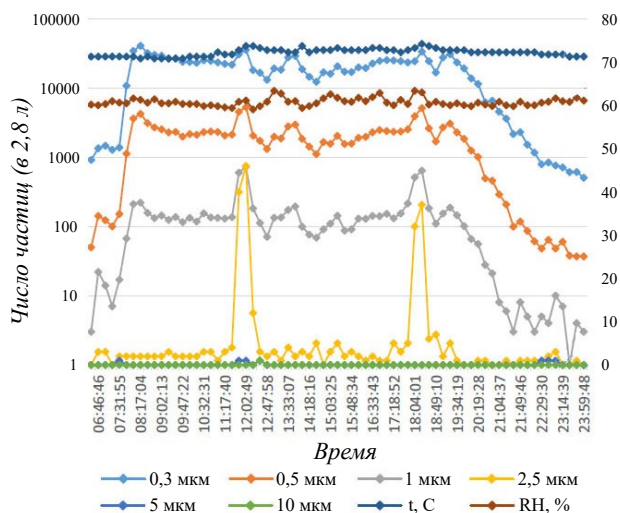


Рис. 7. Изменение числа частиц различного диаметра в течение сут 01.04.2019 г. в тренажерном зале. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат слева — число частиц, справа — температура и величина RH.

Fig. 7. Variation in the number of different size particles during the day on April 1, 2019, in the training gym. At the x-axis is the current time, y-axis on the left side is the number of particles in cubic foot, on the right side — the temperature and RH.

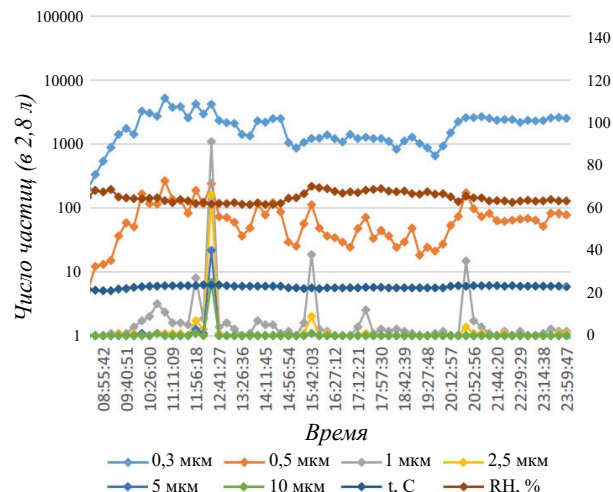


Рис. 8. Изменение числа частиц различного диаметра в комнате отдыха в течение сут 25.04.2019 г. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат слева — число частиц, справа — температура и величина RH.

Fig. 8. Variation in the number of different size particles during the day on April 25, 2019, in the recreation room. At the x-axis is the current time, y-axis on the left side is the number of particles in cubic foot, on the right side — the temperature and RH.

$\geq 0,3$ мкм и $\geq 0,5$ мкм. Пример (см. рис 8) — изменения 25.04.

Можно сделать вывод, что появление человека, вызывающее 1 тип событий в относительно безлюдном помещении, приводит к подъему в воздух осевших частиц субмикронного диапазона, но не крупных (в несколько микрон) частиц. Действия человека (по-видимому, активные), вызывающие 2 тип событий, приводят к подъему в воздух не только субмикронных, но и крупных, микронных частиц. А вот события 3 типа (не обязательно связанные с человеком!) — появление в воздушной среде частиц с размерами в несколько микрон при отсутствии заметных колебаний концентрации частиц с размерами $\geq 0,3$ мкм, $\geq 0,5$ мкм и $\geq 1,0$ мкм — позволяют предположить возможное наличие жизнеспособных частиц, в частности, спор грибов, в воздушной среде (что необходимо подтвердить анализом размеров зарегистрированных частиц).

Также очевидно, что все три типа события можно связать с тревожными (предаварийными) ситуациями разного рода. Событие 1 типа может привести к превышению предельного уровня запыленности и создать угрозу здоровью; события 2 типа характерны для аварийных ситуаций техногенного плана, сопровождающихся генерацией нейтральных аэрозолей, а события 3 типа характеризуются высокой вероятностью наличия в воздухе жизнеспособных частиц и ухудшения

микробиологической обстановки. Для регистрации и анализа всех трех типов событий необходимы не разовые измерения, а мониторинг счетной концентрации и размеров частиц в воздушной среде.

В целом можно констатировать, что поставленные в программе эксперимента SIRIUS 19 перед группой НИЦ КИ и МГУ задачи выполнены: проведено исследование динамики накопления аэрозольных частиц в обитаемом герметичном помещении с помощью лазерного счетчика частиц; результаты измерений сопоставлены с результатами микробиологического анализа; проанализирована возможность использования счетчика частиц в космическом корабле в качестве индикатора микробиологической обстановки и возможность регистрации спор грибов в воздушной среде обитаемого герметичного объема с учетом фоновой концентрации аэрозолей.

Следует отметить большую информационную ценность системы мониторинга воздушной среды в герметичных изолированных объектах и рекомендовать обязательное её проектирование и установку как при будущих экспериментах SIRIUS, так и в иных герметичных изолированных объектах.

Особо следует подчеркнуть, что в результате проведенной работы была выполнена отдельно отмеченная в программе данного этапа задача — обоснование целесообразности включения ручного лазерного счетчика аэрозольных частиц в состав комплекта научных приборов на борту

космической станции, предполагающей длительное пребывание экипажа, и экспериментально продемонстрирована высокая информативность получаемых с его помощью данных.

Оказалась не реализованной задача поиска корреляций между спектром размеров аэрозолей и различными техногенными процессами (например, в момент проведения экипажем различных технических операций) из-за того, что программа работ экипажа таких работ не содержала. Не удалось также проследить уровни запыленности помещений модуля «лунной пылью» после имитации высадки на Луну, так как в последний момент реальная работа на имитаторе лунной поверхности была заменена виртуальной.

Эти задачи предстоит решать в ходе следующих экспериментов SIRIUS, поскольку планируется дальнейшее развитие программы. Следующим этапом исследований будет восьмимесячный изоляционный эксперимент, а затем — годовое исследование.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 1807 от 14.08.2019 г.)

Работа была поддержана грантом МГУ имени М.В. Ломоносова для поддержки ведущих научных школ МГУ «Депозитарий живых систем Московского университета» в рамках Программы развития МГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чистые помещения. Под ред. И. Хаякавы. Пер. с японск. под ред. В.Г. Ржанова и В.И. Ушакова. М.: «Мир», 1990, 456.
2. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации. Пер. с англ. под ред. В.И. Калечица. М.: Изд. «Клинтрум», 2002, 304.
3. Аксель-Рубинштейн В.З. Санитарная химия атмосферы гермообъектов. СПб., 2010, 354.
4. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017 «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды». Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. М.: Изд. Стандартиформ, 2017, 36.
5. Калечиц В.И. Современные направления в контроле аэрозольных микрозагрязнений. *Чистые помещения и технологические среды*, 2002, (1), 16–21.
6. Александров П.А., Калечиц В.И., Хозяшева Е.С., Шахов М.Н. Мониторинг ультрадисперсных частиц и раннее предупреждение аварийных и предаварийных ситуаций. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2017, 72.
7. Александров П.А., Александрова А.В., Антонов Е.А., Весёлая М.И., Калечиц В.И., Ковбасюк И.Е., Лашенова Е.А., Маслаков О.Ю., Притчина Е.С., Хозяшева Е.С., Шахов М.Н. Особенности регистрации спор грибов в воздушной среде с помощью счетчиков аэрозольных частиц. *Биотехнология*, 2019, 35 (2), 71–79. doi: 10.21519/0234-2758-2019-35-2-71-79.
8. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. ISBN: 978 92 890 0006 2. Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ, 2013, 20. Health effects of particulate matter. ISBN: 978 92 890 0006 2. WHO/Europe, Copenhagen, 2013, 20.
9. Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные. Женева: Европейское региональное бюро ВОЗ, 2016, 27.
10. Crous P.W., Verkley G.J.M., Groenewald J.Z., Samson R.A. Fungal Biodiversity. CBS Laboratory Manual Series 1. Utrecht: CBS-Fungal Biodiversity Centre, 2009, 269.
11. Domsch K.H., Gams W., Anderson T. Compendium of soil fungi. Second edition. IHW Verlag Ehing, 2007, 672.
12. Hoog G.S. de, Guarro J. Atlas of clinical fungi. Baarn: Centraalbureau voor Schimmelcultures, 1995, 720.
13. Klich M.A. Identification of common *Aspergillus* species. Baarn: Centraalbureau voor Schimmelcultures, 2002, 116.
14. Pitt G.I. A laboratory guide to common *Penicillium* species. CSIRO, Division of Food Processing, 1991. 188.
15. Samson R.A., Houbraken J., Thrane U., Frisvad J.C., Andersen B. Food and indoor fungi. CBS laboratory manual series 2. Utrecht: CBS-Fungal Biodiversity Centre. 2010, 390.
16. WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. Heseltine E., Rosen J. (ed.). WHO Regional Office Europe, 2009, 248.
17. Oxborrow G.S., Fields N.D., Puleo J.R., Herring C.M. Quantitative relationship between airborne viable and total particles. *Health Lab. Sci.*, 1975, 12 (1), 47–51.
18. Ljungqvist B., Reinmüller B. Airborne viable particles and total number of airborne particles: comparative studies of active air sampling. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, 2000, 54 (2), 112–116.
19. De Abreu C.S., Pinto T.J.A., De Oliveira D.C. Environmental Monitoring: A Correlation Study Between Viable and Nonviable Particles in Clean Rooms. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, 2004, 58 (1), 45–53.
20. Raval J.S., Koch E., Donnenberg A.D. Real-time monitoring of non-viable airborne particles correlates with airborne colonies and represents an acceptable surrogate for daily assessment of cell-processing cleanroom performance. *Cytotherapy*, 2012, 14 (9), 1144–1150. doi 10.3109/14653249.2012.698728.

Dynamics of Accumulation of Aerosols and Microscopic Fungi Spores in the Air of a Hermetic Inhabited Object during a Four-Month Isolation Experiment SIRIUS-19

P.A. ALEKSANDROV¹, A.V. ALEKSANDROVA², E.A. ANTONOV¹, V.K. ILYIN³,
V.I. KALECHITS^{1*}, I.E. KOVBASYUK¹, E.A. LASHCHENOVA¹, O.Yu. MASLAKOV¹,
E.S. PRITCHINA¹, N.A. USANOVA³, E.S. KHOZYASHEVA¹, and M.N. SHAKHOV¹

¹ National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

³ Institute of Biomedical Problems Russian Federation State Research Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123007, Russia

*e-mail: Kalechits_VI@nrcki.ru, vik@clri.ru

Received June 4, 2020

Revised October 2, 2020

Accepted November 15, 2020

Abstract—A four-month experiment which reproduced the main temporal characteristics of the real space flight to the Moon in a medico-technical complex has been carried out. The content of aerosols in the indoor air of the hermetic inhabited object was continuously monitored using a Handheld 3016 laser aerosol counter (Lighthouse WS Co, United States). The number of particles was counted automatically, and the number of viable propagules and the species composition of the fungal population were determined by seeding. The results obtained by these two methods were compared, the regularities in dynamics of neutral particles and micromycete spores, as well as their relationship with the crew activity were revealed, and a possibility to use a particle counter on a spacecraft as an indicator of the microbiological situation was analyzed. A general tendency of an increase in the content of fungal spores in the air of the examined premises was observed from 2–5 at the beginning of the experiment to 287 ± 36 CFU/m³ closer to its end; however, this value did not exceed the sanitary standard recommended by WHO. Species potentially harmful for human health (*Aspergillus fumigatus*, *A. niger* and *A. sydowii*) were detected, but their spore load was extremely low.

Key words: indoor air, spaceships, microbiological contamination, aerosol particle counter

Funding—The work was supported by the National Research Center “Kurchatov Institute” (decree no. 1807 from 14.08.2019) and by the Moscow State University (grant for Leading Scientific Schools «Depository of the Living Systems» within the framework of the MSU Development Program).

doi: 10.21519/0234-2758-2020-36-6-138-148