

Научная статья

УДК 544.772:561.28

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ СПОРАМИ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ГРИБОВ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ
ЗАГРЯЗНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
ЗАМКНУТЫХ ОБИТАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Иван Евгеньевич Ковбасюк^{1✉}, Евгений Андреевич Антонов²,
Павел Борисович Васильев³**

^{1,2,3} *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
(НИИЦ «Курчатовский институт»), Москва, Россия*

¹ *Kovbasyuk_IE@nrcki.ru[✉], SPIN-код: 3674-1589*

² *aea95rus@yandex.ru, SPIN-код: 4026-4078, ORCID: 0009-0000-8324-6089,
WoS Researcher ID: ABE-7848-2021*

³ *sear.brem@inbox.ru*

*Аннотация. В работе рассматривается возможность оценки микробиологических загрязнений в условиях замкнутых обитаемых объектов с помощью оптических счётчиков частиц. Для этого для трёх видов микромицетов — *Aspergillus sydowii*, *Cladosporium cladosporioides* и *Penicillium chrysogenum*, наиболее распространённых для таких помещений, были найдены оптические размеры эквивалентных сфер, соответствующие каждому виду спор, а также характерные для данных спор диапазоны размеров детектируемых счётчиком частиц. Также получены соотношения числа частиц к ожидаемому числу КОЕ в отобранной пробе.*

Ключевые слова: аэрозоль, биоаэрозоль, микроорганизм, микробиологическое загрязнение, микромицет, спора, грибок, замкнутое помещение

Для цитирования: Ковбасюк И.Е., Антонов Е.А., Васильев П.Б. Исследование рассеяния лазерного излучения спорами микроскопических грибов для контроля микробиологических загрязнений в условиях замкнутых обитаемых объектов // Альманах современной метрологии. 2026. № 2 (46). С. 149–167.

Original article

**INVESTIGATION OF THE SCATTERING
OF LASER RADIATION BY MICROSCOPIC FUNGAL
SPORES TO CONTROL MICROBIOLOGICAL
CONTAMINATION IN CONFINED INHABITED OBJECTS**

**Ivan E. Kovbasyuk^{1✉}, Evgeny A. Antonov²,
Pavel B. Vasiliev³**

© Ковбасюк И.Е., Антонов Е.А., Васильев П.Б., 2026

Almanac of Modern Metrology № 2 (46) 2026

^{1, 2, 3}National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

¹Kovbasyuk_I.E@nrcki.ru[✉], SPIN-code: 3674-1589

²aea95rus@yandex.ru, SPIN-code: 4026-4078, ORCID: 0009-0000-8324-6089,
WoS Researcher ID: ABE-7848-2021

³sear.brem@inbox.ru

Abstract. The paper considers the possibility of estimating microbiological contamination in conditions of confined inhabited objects using optical light-scattering airborne particle counters. For this purpose, for the three micromycete species — *Aspergillus sydowii*, *Cladosporium cladosporioides* and *Penicillium chrysogenum*, which are most common in such rooms, the optical sizes of equivalent spheres corresponding to each type of spore, as well as the size ranges of particles detected by the counter, characteristic of these spores, were found. The ratios of the number of particles to the expected number of CFU in the selected sample were also obtained.

Keywords: aerosol, bioaerosol, microorganism, microbial contamination, micromycete, spore, fungus, confined room

For citation: Kovbasyuk I.E., Antonov E.A., Vasiliev P.B. Investigation of the scattering of laser radiation by microscopic fungal spores to control microbiological contamination in confined inhabited objects. *Almanac of Modern Metrology*. 2026; 46 (2): 149–167.

Проблема запылённости воздуха впервые возникла в конце XIX века во время борьбы с инфекциями в больницах. Позже, в середине XX века, с развитием промышленности контроль технологической чистоты воздуха от взвешенных частиц стал актуальным и в этой области человеческой деятельности [1]. В настоящее время существует и продолжает развиваться технология чистых производственных помещений, появились и совершенствуются стандарты для чистых помещений¹, для различных отраслей промышленности применяется широкая классификация чистоты воздуха по содержанию взвешенных в нём микрочастиц. Чистые помещения отличаются своей конструкцией, которая сводит к минимуму поступление, генерацию и накопление частиц внутри помещения, а также тем, что концентрация аэрозольных частиц в нём контролируется на постоянной основе. Тем не менее контроль запылённости воздуха важен не только на промышленных производствах или в операционных. Всё большее значение приобретает проблема качества воздуха внутри обычных помещений (Indoor Air Quality) из-за промышленных выбросов и прочих загрязнений. Но есть и ещё одна категория замкнутых помещений, для которых контроль аэрозольных и особенно микробиологических загрязнений имеет исключительное значение [2]. Речь идёт о замкнутых обитаемых объектах, таких как самолёты, космические аппараты и станции, подводные аппараты и убежища. Для всех них характерно длительное

¹ ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. М.: Стандартинформ, 2017. 36 с.

нахождение значительного числа людей в замкнутых условиях. Система вентиляции и воздухоподготовки в основном нацелена на поддержание уровня кислорода¹ и плохо справляется с характерным для замкнутых помещений накоплением аэрозольных загрязнений. Кроме того, традиционные методы контроля микробиологических загрязнений в условиях замкнутых объектов невозможны или затруднены из-за необходимости поддержания значительного запаса чашек Петри с питательной средой, обустройства мест хранения и инкубирования чашек, их последующей утилизации, а также риска вторичного заражения воздушной среды от уже использованных чашек². Поэтому возникает необходимость проработки возможности оценки микробиологических загрязнений по уровню общих аэрозольных загрязнений.

В промышленности для различных технологических задач, требующих контроля концентрации аэрозольных частиц, будь то микроэлектроника, фармацевтическая промышленность, медицина, аэрокосмическая и автомобильная промышленность, для контроля параметров воздушной смеси используются счётчики аэрозольных частиц, принцип работы которых основан на принципе рассеяния света³. Эти высокотехнологичные измерительные приборы позволяют измерять частицы поштучно в широком диапазоне размеров. В Институте информационных технологий НИЦ «Курчатовский институт» с использованием счётчиков частиц был проведён ряд работ по раннему обнаружению аварийных и предаварийных ситуаций (РОАП), основанный на мониторинге концентрации аэрозольных частиц в замкнутых помещениях для контроля технологических процессов на установках и предприятиях, где риск аварии необычайно высок. Предложенный метод показал очень высокую чувствительность в сравнении с доступными аналогами и позволил регистрировать возникновение нештатной ситуации на самой ранней, предаварийной стадии, когда ещё остаётся возможность принять своевременные меры и предотвратить её развитие [3], [4]. Также счётчики использовались для контроля накопления аэрозолей внутри замкнутого герметичного обитаемого объекта в условиях серии уникальных наземных экспериментов SIRIUS (Scientific International Research In Unique terrestrial Station) в 2019–2024 годах на базе Института медико-биологических проблем Российской академии наук, имитирующих полёт космического аппарата с экипажем на Луну, стыковку с лунной орбитальной

¹ ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартинформ, 2013. 15 с.

² ГОСТ Р ИСО 16000-17-2012. Воздух замкнутых помещений. Часть 17. Обнаружение и подсчёт плесневых грибов. Метод культивирования. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.

ГОСТ Р ИСО 16000-18-2013. Воздух замкнутых помещений. Часть 18. Обнаружение и подсчёт плесневых грибов. Отбор проб осаждением. М.: Стандартинформ, 2014. 23 с.

³ ГОСТ Р ИСО 21501-4-2012. Получение распределения частиц по размерам. Оптические методы оценки отдельных частиц. Часть 4. Счётчики частиц в воздухе для чистых зон, работающие на принципе рассеяния света. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

станцией и высадку модуля на поверхность Луны [5], [6]. На основании полученных результатов в данном исследовании было выдвинуто предположение о целесообразности использовать счётчик аэрозольных частиц в том числе как маркер микробиологических загрязнений в условиях замкнутых обитаемых объектов, когда традиционные методы контроля невозможны или затруднены.

В большинстве работ [7]–[11], исследующих микробиологические загрязнения с помощью счётчиков аэрозольных частиц, не учитываются особенности регистрации частиц оптическими приборами, а также «неидеальность» объектов исследования — живых организмов. Поэтому возникает задача изучить поведение оптического счётчика аэрозольных частиц при детекции, к примеру, спор микроскопических грибов нескольких видов.

На небольшом стенде (рис. 1) создавалась определённая концентрация взвешенных в воздухе спор известного вида микроскопических грибов и проводился последовательный отбор пробы счётчиком частиц и микробиологическим импактором.

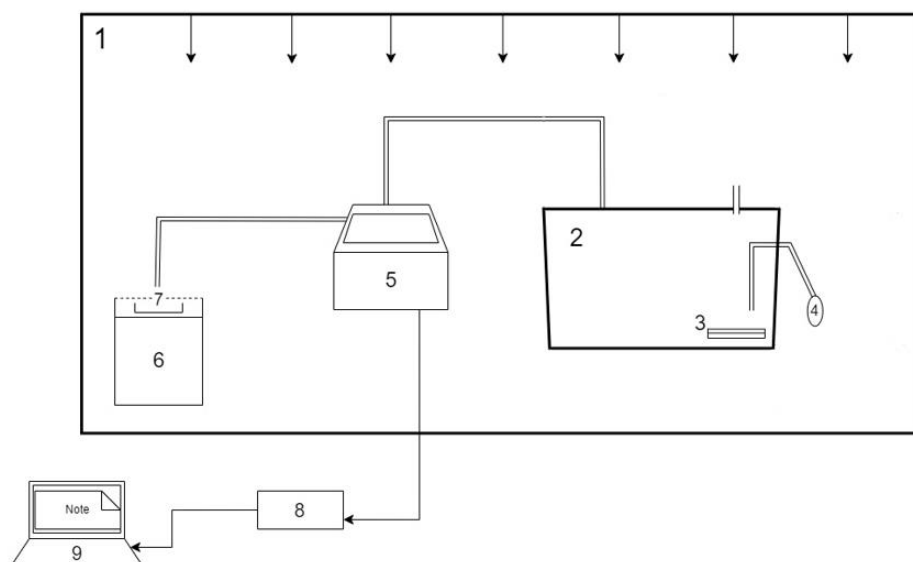


Рис. 1. Принципиальная схема стенда для проведения измерений: 1 — ламинарный бокс; 2 — измерительная камера; 3 — чашка Петри с колонией микромицетов; 4 — побудитель импульсной воздушной струи; 5 — оптический счётчик аэрозольных частиц; 6 — аспиратор; 7 — чашка Петри с питательной средой; 8 — анализатор амплитуд импульсов; 9 — персональный компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the measuring stand: 1 — laminar flow box; 2 — measuring chamber; 3 — Petri dish with a colony of micromycetes; 4 — pulsed air jet stimulator; 5 — optical airborne particle counter; 6 — microbial sampler; 7 — Petri dish with nutrient medium; 8 — multichannel pulse height analyzer; 9 — personal computer

Стенд был помещён в рабочую зону ламинарного бокса класса ИСО 5 (обеспечивает концентрацию менее 10 200 частиц крупнее 0,3 мкм, менее 3520 частиц крупнее 0,5 мкм и менее 832 частиц крупнее 1 мкм в 1 м³) (см. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017) для снижения влияния сторонних факторов и состоял из замкнутой измерительной камеры с тремя отверстиями в верхней грани и боковой стенке. Через одно из отверстий отбирались пробы воздуха, через другое отобранный объём восполнялся чистым воздухом, поступающим из ламинара, а третье было необходимо для подключения побудителя импульсной воздушной струи для поднятия спор с предварительно помещённой внутри камеры чашки Петри с колонией исследуемого вида микромицета. С помощью побудителя создавалась и поддерживалась определённая концентрация спор внутри измерительной камеры. Побудитель импульсной струи представлял собой грушу с трубкой; при этом путём варьирования расстояния от конца трубки до чашки Петри с колонией гриба, частоты и интенсивности нажатий на грушу регулировалась величина импульса на чашку и, следовательно, регулировалась создаваемая внутри камеры концентрация поднятых таким образом спор. Камера целиком находилась внутри ламинарного бокса, её герметичность принималась достаточной для целей проводимого исследования. В работе использовался типичный современный портативный оптический счётчик аэрозольных частиц Solair 3100 с расходом воздуха 28,3 л/мин (1 CFM), работающий по принципу рассеяния света (рис. 2).

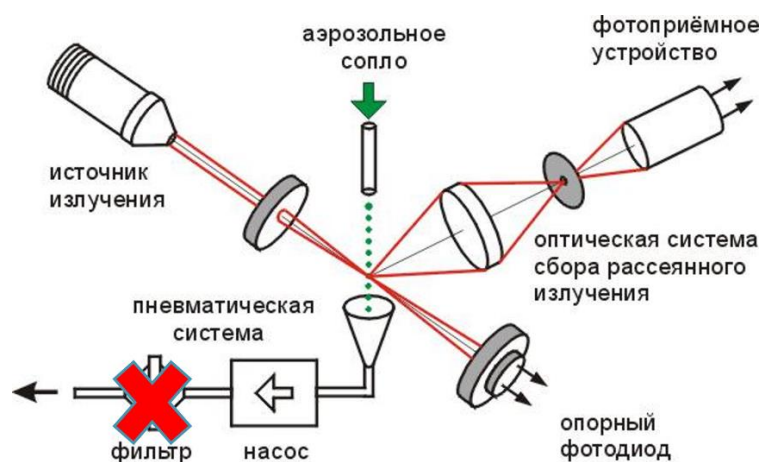


Рис. 2. Принцип действия оптического счётчика частиц

Fig. 2. The operation principle of an optical particle counter

Счётчик имел расширенный до восьми каналов диапазон с двумя дополнительными размерными каналами в представляющей интерес области частиц среднего размерного диапазона 1–3 мкм: 2,0 и 2,5 мкм. Таким образом, при отборе пробы регистрировались данные для восьми размеров: 0,3; 0,5;

1,0; 2,0; 2,5; 3,0; 5,0 и 10,0 мкм. Для отбора пробы на чашку Петри использовался инерционный импактор ActiveCount 100 со стандартной производительностью 100 л/мин и чувствительностью 1 мкм в соответствии с требованиями ИСО 14698¹. Принцип работы такого устройства приведён на рис. 3. Для проведения измерений из счётчика извлекался установленный выходной фильтр. Принимая во внимание разность расходов использовавшихся в работе приборов и невозможность их регулировки без ущерба для их функциональности, выходная трубка от счётчика фиксировалась на определённом расстоянии от импакторной головки аспиратора и плавно перемещалась оператором во время эксперимента для более равномерного засеивания установленной внутри чашки Петри. Счётчик и аспиратор также были установлены внутри ламинарного бокса; все элементы измерительной части стенда обдувались направленным потоком чистого воздуха.

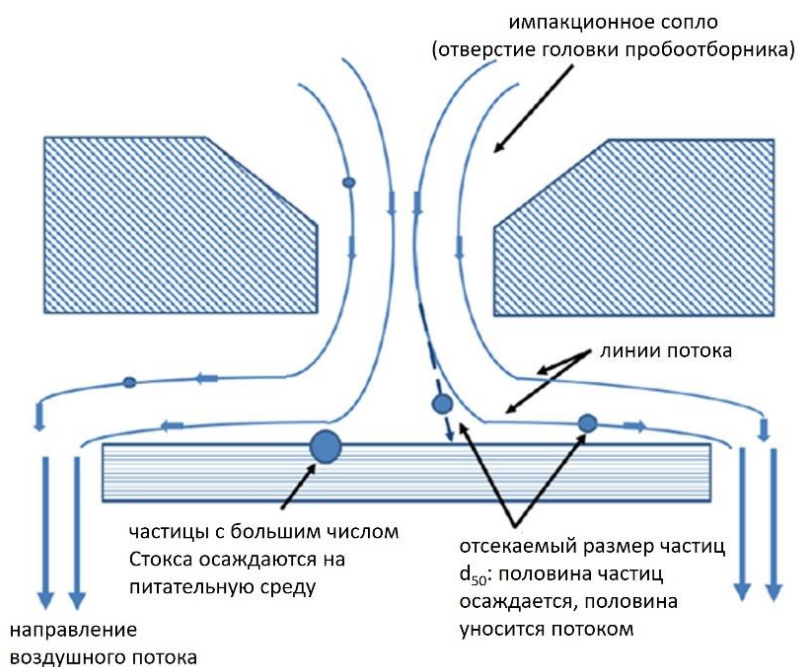


Рис. 3. Принцип действия аспиратора импакторного типа [12]

Fig. 3. The operation principle of microbial sampler of an impactor type [12]

В основе принципа работы импактора (см. рис. 3) лежит идея о соударении частиц — носителей микроорганизмов с поверхностью агара. Воздух проходит через отверстия в пробоотборной головке с большой линейной скоростью,

¹ ГОСТ ИСО 14698-1-2005. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Контроль биозагрязнений. Часть 1. Общие принципы и методы. М.: Стандартинформ, 2008. 28 с.

после чего струи воздуха резко меняют направление и взвешенные крупные частицы, обладающие большой инерцией, в том числе микроорганизмы, осаждаются на чашку Петри. Линейная скорость имеет большое значение, поскольку определяет размер частиц, которые в конечном счёте будут осаждены на чашке. Для любого импактора ключевой характеристикой является пороговое значение аэродинамического диаметра, при котором половина частиц этого размера минует чашку с питательной средой, а половина осадится на питательную среду. Это значение определяет физическую эффективность импактора и является его разрешающей способностью (см. ГОСТ ИСО 14698-1-2005). Используемый в данной работе импактор имел 300 отверстий; общий расход воздуха составлял 100 л/мин при линейной скорости 19 м/с через каждое отверстие и разрешающей способности 1 мкм.

С помощью многоканального анализатора амплитуды импульсов Amptek MCA-8000D, подключённого сразу после фотодиода счётчика, регистрировался спектр размеров, то есть распределение зависимости числа импульсов от их амплитуды по 8000 каналам, и на экране компьютера строился график зависимости.

Важно отметить, что, в силу принципа своего действия (см. рис. 2), счётчик аэрозольных частиц измеряет не фактические размеры проходящей через его измерительную камеру частицы, но её эквивалентный оптический диаметр, то есть диаметр сферы, имеющей то же сечение рассеяния, что и измеряемая частица. Именно эта величина измеряется в оптических приборах, типа счётчиков и спектрометров аэрозолей, и определяется как размер частицы. В качестве эталонных частиц для счётчиков обычно используют монодисперсные сферические частицы полистирольного глобулированного латекса (polystyrene latex, PSL), для которых стандартное отклонение среднего размера не превышает $\pm 2,5\%$ (см. ГОСТ Р ИСО 21501-4-2012).

После окончания отбора проб чашка Петри извлекалась из импактора, запечатывалась и инкубировалась; затем проводился визуальный подсчёт числа колоний и оценивался их видовой состав.

Для рассмотрения были выбраны три наиболее широко распространённых в замкнутых обитаемых помещениях вида микромицетов: *Aspergillus sydowii*, *Cladosporium cladosporioides* и *Penicillium chrysogenum* (рис. 4). Каждый из рассматриваемых видов имеет свои отличительные особенности, а их конидии не похожи друг на друга. К примеру, виды *A. sydowii* и *P. chrysogenum* имеют шаровидные конидии, а форма конидий вида *C. cladosporioides* варьируется от эллипсоидной до яйцевидной. При этом конидии вида *A. sydowii* имеют негладкую, шероховатую поверхность, так называемый бородавчатый орнамент, а поверхность конидий двух других видов гладкая. Размеры также варьируются от вида к виду и для каждого вида обычно находятся в пределах от 2,5 до 4 мкм для *P. chrysogenum*; от 3 до 3,5 мкм для *A. sydowii* и от 1 до 3,9 мкм (ширина) к более 2,8 мкм (длина) для *C. cladosporioides*.

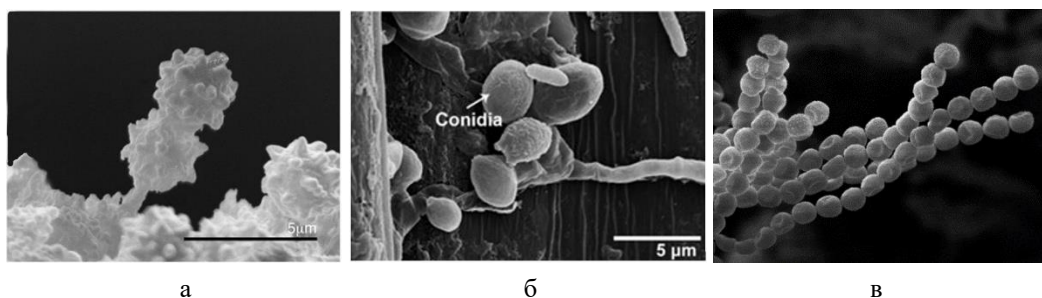


Рис. 4. Изображения спор грибов: а — *Aspergillus sydowii*; б — *Cladosporium cladosporioides*; в — *Penicillium chrysogenum*, полученные под электронным микроскопом [13]–[15]

Fig. 4. Images of fungal spores: а — *Aspergillus sydowii*; б — *Cladosporium cladosporioides*; в — *Penicillium chrysogenum* obtained under an electron microscope [13]–[15]

В процессе эксперимента счётчиком частиц отбиралась проба воздуха из измерительной камеры, полученный сигнал от фотоприёмника проходил через анализатор амплитуд импульсов и на экране компьютера строилось распределение по амплитудам. Полученный для каждого эксперимента пик выделялся, после чего определялось медианное значение амплитуды в мВ. На основании данных о пороговых значениях каналов счётчика частиц была восстановлена калибровочная кривая и аппроксимирована функцией 3-й степени, по которой значению амплитуды в мВ сопоставлялся размер частиц в мкм. Параллельно с этим результаты измерения фиксировались в буфере памяти счётчика, и впоследствии на основании этих данных строились гистограммы по размерным каналам.

Ниже приведены примеры полученных распределений и усреднённых гистограмм по всем сериям измерений для каждого вида микромицета (рис. 5–10).

Для вида *A. sydowii* (рис. 5) фиксировался чётко очерченный пик относительно фона как на малых, так и на больших концентрациях частиц. Разрешающая способность спор данного вида по размерам во многом напоминает тестовые полистирольные сферы. Полученный средний оптический эквивалент размера спор составил $2,6 \pm 0,7$ мкм, что заметно меньше справочных значений размеров спор, лежащих в диапазоне от 3,0 до 3,5 мкм, что уже отмечалось выше. Достаточно значительный разброс стандартного отклонения среднего размера может быть вызван как возрастом мицелия и конидий гриба, использовавшихся в сериях экспериментов, так и негладкими свойствами поверхности конидий.

На полученных для вида *A. sydowii* (рис. 6) гистограммах видно, что споры регистрировались в узком диапазоне размеров, преимущественно в канале 2,0–2,5 мкм. По оси ординат откладывалось среднее число частиц в пробе.

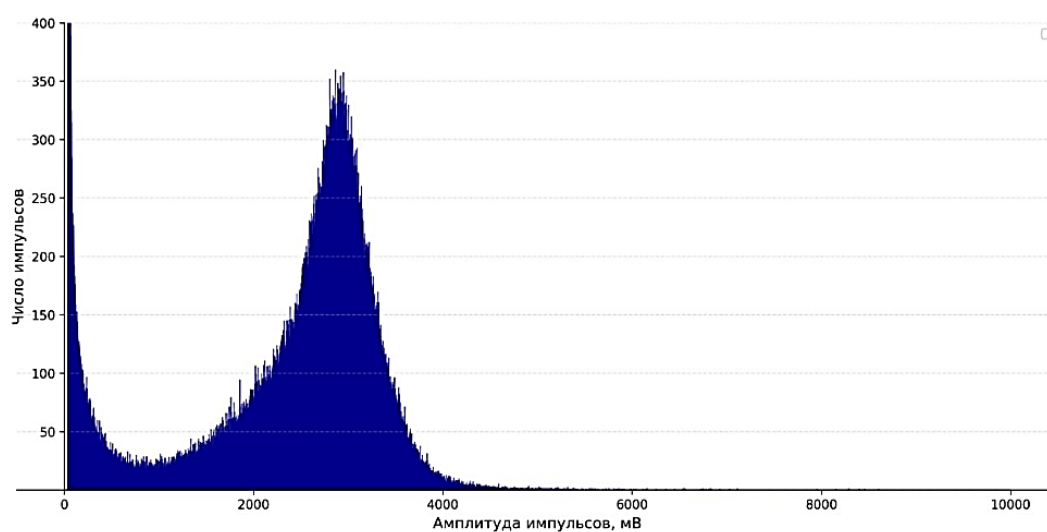


Рис. 5. Распределение частиц для вида *A. sydowii*.
Амплитуда импульсов соответствует размеру частиц

Fig. 5. Particle distribution for the species *A. sydowii*.
The amplitude of the pulses corresponds to the particle size

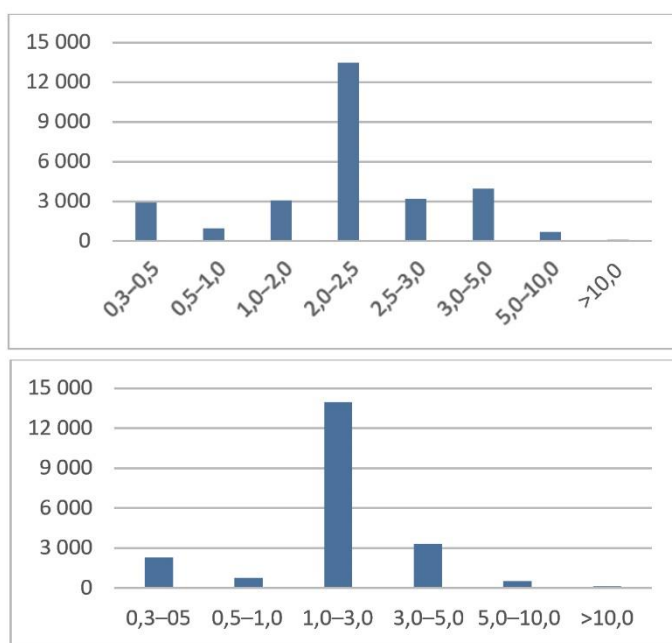


Рис. 6. Гистограммы числа частиц (ось y) по каждому размерному каналу (ось x) счётчика для вида *A. sydowii*

Fig. 6. Histograms of the number of particles (y axis) in each dimensional channel (x axis) of the counter for the species *A. sydowii*

Для спор вида *P. chrysogenum* (рис. 7) также наблюдался отчётливо выраженный относительно фона аккуратно очерченный пик. Полученное значение эквивалентного оптического диаметра составило $2,3 \pm 0,2$ мкм, что намного ниже реальных размеров спор от 2,5 до 4,0 мкм.

На полученных гистограммах (рис. 8) усреднённого числа частиц в пробе видно, что счётчиком регистрировались частицы преимущественно в диапазоне 2,0–2,5 мкм, как и в случае с конидиями вида *A. sydowii*.

Вид пиков (рис. 9), полученных для спор вида *C. cladosporioides*, заметно отличался от аналогичных пиков для других видов: пик регистрировался заметно шире, а соотношение «сигнал/шум» было несколько ниже. Такой вид обусловлен неправильной формой самих спор, размер одного измерения которых превышает остальные, тем самым разные проекции при пролёте спор через лазерный луч дают разные амплитуды отражённого сигнала и, следовательно, приводят к размытию наблюдаемого распределения по размерам. Полученный оптический эквивалент диаметра составил $2,9 \pm 0,2$ мкм, то есть практически по нижней границе размеров для спор данного вида грибов, что может быть обусловлено как тем, что число таких конидий преобладает, так и тем, что более крупные споры, с одной стороны, тяжелее отрываются от конидиеносца (или, другими словами, требуется существенно большее воздействие на мицелий, чтобы привести их во взвешенное состояние), с другой — за счёт более крупных размеров и, следовательно, веса такие споры больше подвержены седиментации.

Полученная разница между эквивалентными оптическими диаметрами исследуемых спор и их реальными размерами, вероятнее всего, связана как с негладкой поверхностью конидий, так и в большей степени поглощением испущенного излучения толстой оболочкой самих спор, которая защищает клетку от факторов внешнего воздействия. Очевидно, что полученный в серии экспериментов результат свидетельствует, что индикатриса рассеяния для сложных оптических объектов, таких как споры микроскопических грибов, будет значительно отличаться от индикатрисы рассеяния для однородных сферических полупрозрачных латексных частиц. Поэтому вопрос интерпретации данных при детектировании неидеальных частиц является актуальным.

При наблюдении результата на экране счётчика или после построения гистограммы можно наблюдать, на первый взгляд, удивительную картину (рис. 10): раздвоение пика от 2,0 до 2,5 мкм и от 3,0 до 5,0 мкм с локальным минимумом от 2,5 до 3,0 мкм. Полученный эффект обусловлен относительной размытостью пика и тем, что он охватывает достаточно широкий диапазон размеров при неравномерности шага разбивки каналов. Таким образом, увеличение разрешающей способности по размерным каналам для счётчика в диапазоне средних и больших размеров может приводить к неожиданному эффекту и не способствовать облегчению интерпретации данных.

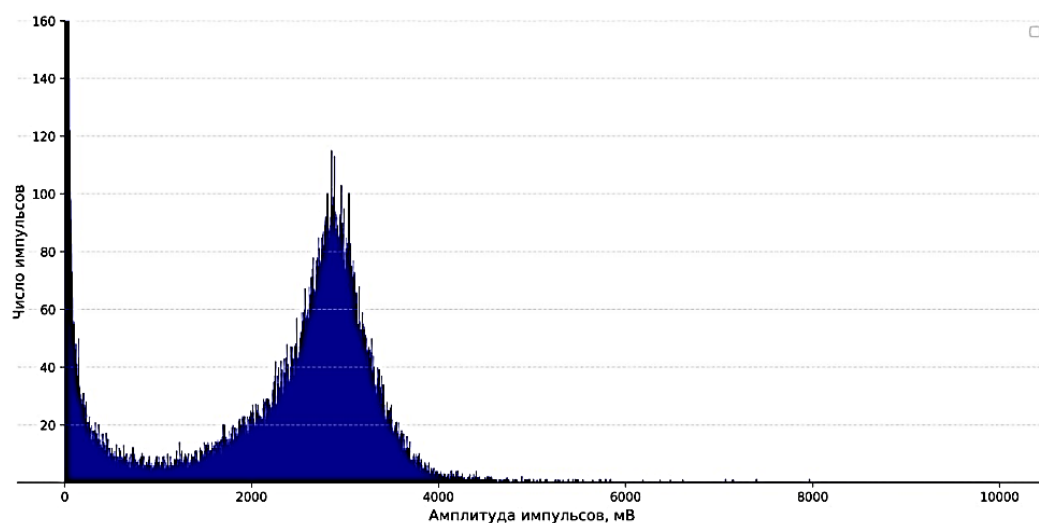


Рис. 7. Распределение частиц для вида *P. chrysogenum*

Fig. 7. Particle distribution for the species *P. chrysogenum*

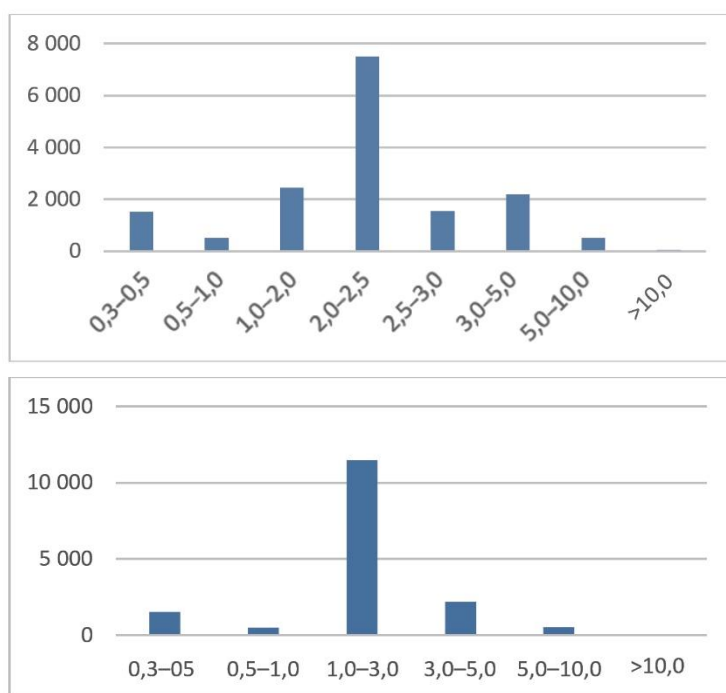


Рис. 8. Гистограммы числа частиц (ось y) по каждому размерному каналу (ось x) счётчика для вида *P. chrysogenum*

Fig. 8. Histograms of the number of particles (y axis) in each dimensional channel (x axis) of the counter for the species *P. chrysogenum*

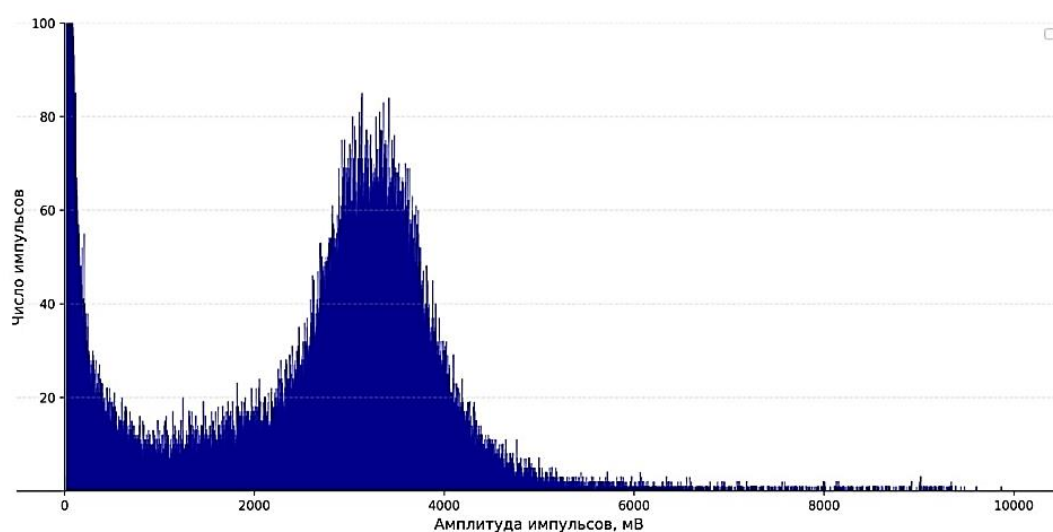


Рис. 9. Распределение частиц для вида *C. cladosporioides*

Fig. 9. Particle distribution for the species *C. cladosporioides*

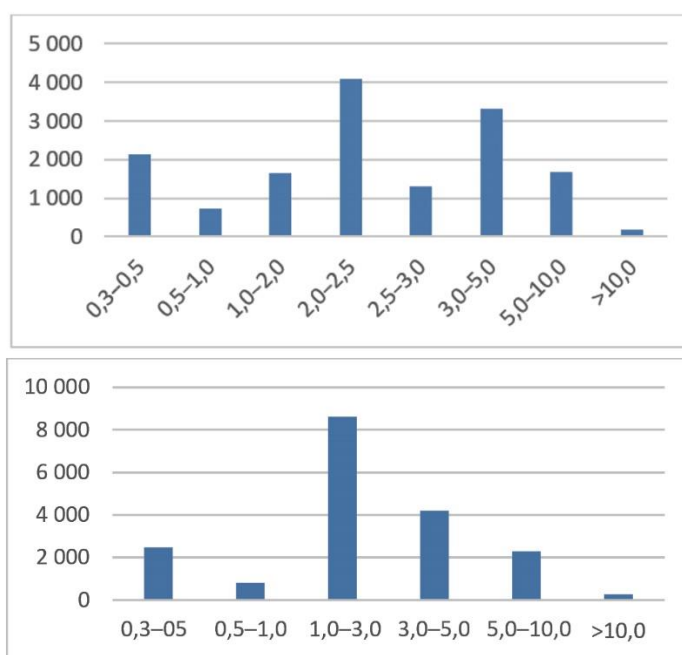


Рис. 10. Гистограммы числа частиц (ось y) по каждому размерному каналу (ось x) счётчика для вида *C. cladosporioides*

Fig. 10. Histograms of the number of particles (y axis) in each dimensional channel (x axis) of the counter for the species *C. cladosporioides*

Если обобщить все полученные счётчиком данные (рис. 11), то видно, что для каждого вида более 2/3 всех зарегистрированных частиц лежит в диапазоне от 1,0 до 5,0 мкм. А так как данный размерный канал широко распространён у счётчиков частиц и, более того, является одним из стандартных размерных каналов, то его использование для потенциального контроля микробиологических загрязнений представляется авторам наиболее перспективным.

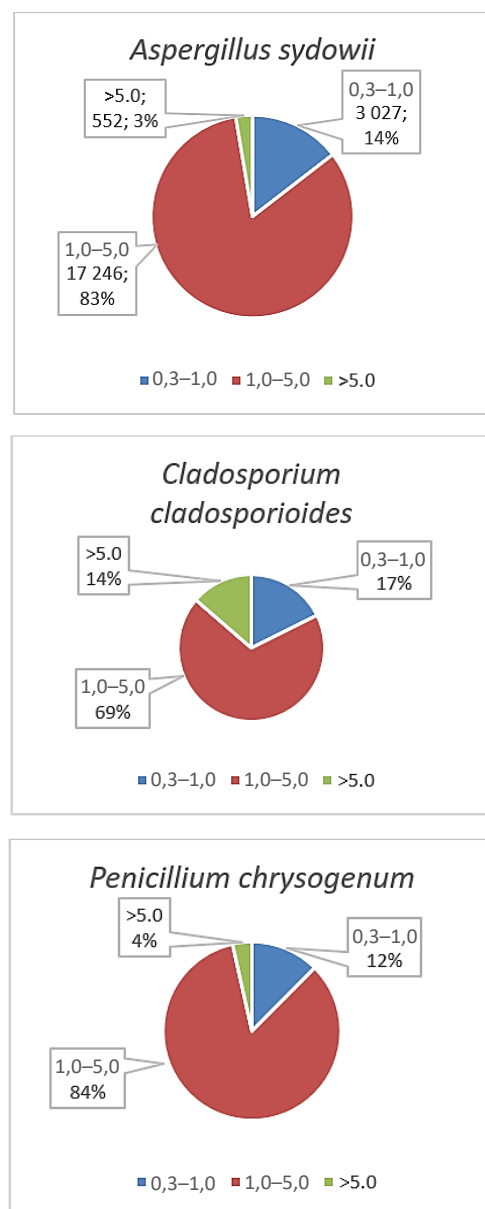


Рис. 11. Соотношение числа частиц относительно их размера в мкм в отобранных пробах
 Fig. 11. The ratio of the number of particles relative to their size in microns in the selected samples

После инкубации отобранных проб на чашке Петри проводился анализ видового состава выросших колоний и подсчитывалось число КОЕ. На основании полученного на чашке числа КОЕ по формуле Феллера для заданного числа отверстий в головке используемого в работе импактора проводилась статистическая коррекция и определялось наиболее вероятное число КОЕ в отобранной пробе [16], [17]:

$$P_r = N \sum_{n=1}^r \frac{1}{N - n + 1},$$

где P_r — ожидаемое число КОЕ в пробе; N — число отверстий головки импактора; r — число КОЕ на чашке.

Уравнение Феллера оценивает вероятность попадания нескольких частиц в одно отверстие в головке импактора и образования одной видимой колонии и, следовательно, даёт статистическую поправку на то, сколько микроорганизмов остались неучтёнными [18]. После определялось соотношение общего числа зарегистрированных счётчиком частиц в заданном диапазоне размеров к числу жизнеспособных КОЕ. Для рассматриваемых видов это соотношение было разным. Соотношение общего числа частиц к числу жизнеспособных КОЕ варьировалось в широком диапазоне значений: в среднем от 37 до 110 для *A. sydowii*; от 320 до 500 для *C. cladosporioides* и от 12 до 50 для *P. chrysogenum*.

Полученные данные по числу КОЕ для *A. sydowii* позволили разделить их на три условных и примерно равных группы: с небольшим числом КОЕ на чашке, средним и близким к полному засеvu. Для каждой группы были вычислены средние значения КОЕ и им сопоставлены соответствующие средние значения счётной концентрации частиц более 1 мкм. Полученные таким образом три точки аппроксимировались прямой линией (рис. 12) с хорошей точностью, что согласуется с полученными прежде данными американского Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА; National Aeronautics and Space Administration, NASA)¹.

Собранные для двух других видов данные ввиду особенностей генерации частиц имеющегося стенда и не стоявшей изначально задачи создания и поддержания строго определённой споровой нагрузки не позволили разделить их на аналогичные первому случаю три группы по числу КОЕ.

При этом для всех трёх видов отмечались разные коэффициенты соотношения общего числа аэрозольных частиц к числу жизнеспособных, что отчасти связано с разными размерами и подвижностью конидий каждого вида, но тем не менее представляет дополнительный интерес для продолжения работы.

¹ NASA NHB-5340. Biological Handbook for Engineers. Marshall Space Flight Center, October 1976.

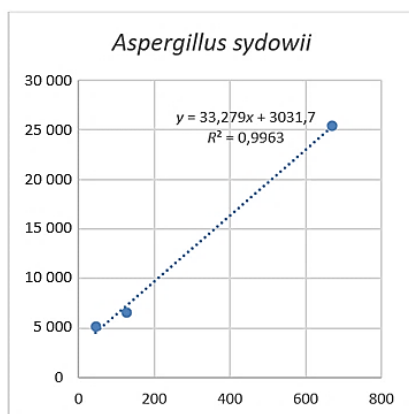


Рис. 12. Соотношение счётной концентрации частиц (ось y) и ожидаемого числа КОЕ в пробе (ось x) для *A. sydowii* (R^2 — коэффициент детерминации, который отражает достоверность аппроксимации)

Fig. 12. The ratio of the number particle concentration (y axis) and the expected CFU number in the sample (x axis) for *A. sydowii* (R^2 — coefficient of determination which represents the accuracy of the approximation)

Выводы

Даже для сферических и субсферических частиц наблюдается значительное изменение оптического эквивалента размера в сторону уменьшения относительно действительного значения размера частиц. Таким образом, при проведении косвенного микробиологического контроля с помощью анализа общих аэрозольных данных необходимо учитывать это изменение при детектировании микроорганизмов, в том числе спор микроскопических грибов.

Для используемых в исследовании микроскопических грибов споры регистрируются счётчиком преимущественно в диапазоне размеров 1,0–5,0 мкм. Поэтому именно этот диапазон размеров представляет наибольший интерес в контексте дальнейших оценок микробиологических загрязнений, а также благодаря распространённости данного диапазона размеров у счётчиков частиц.

Полученные данные позволяют сделать предварительный вывод о возможности контроля микробиологических загрязнений с помощью оптического счётчика частиц, но требуют продолжения работы по уточнению зависимости числа КОЕ от счётной концентрации частиц для различных видов микромицетов и проведения оценки возможности регистрации малых уровней микробиологических загрязнений в условиях высоких концентраций нежизнеспособных частиц применительно к замкнутым обитаемым объектам.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» в рамках НИОКР Центра «Исследование процессов генерации и распространения аэрозольных загрязнений в воздушной среде герметичных обитаемых объектов».

Вклад авторов. И.Е. Ковбасюк: концептуализация, методология, формальный анализ, написание статьи. Е.А. Антонов: методология, подготовка образцов культур микромицетов. П.Б. Васильев: проведение измерений, сбор, обработка и статистический анализ данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Funding. The work was carried out with the support of the National Research Center “Kurchatov Institute” within the scientific research and development Research of the Processes of Generation and Distribution of Aerosol Contamination in the Air Environment of Hermetically Inhabited Objects.

Contribution of the authors. I.E. Kovbasyuk: conceptualization, methodology, formal analysis, writing the article. E.A. Antonov: methodology, preparation of samples of micromycete cultures. P.B. Vasiliev: measurements, collection, processing and statistical analysis of data.

Conflict of interests. The authors declare that they have no potential conflict of interest in relation to the study in this article.

Список источников

1. Уайт В. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации: М.: НПЦ «Клинтрум Инструментс», 2023. С. 29–42.
2. Аксель-Рубинштейн В.З. Санитарная химия атмосферы гермообъектов. СПб.: Пресс-Сервис, 2010. 354 с.
3. Александров П.А., Калечиц В.И., Хозяшева Е.С. Мониторинг ультрадисперсных частиц и раннее предупреждение аварийных и предаварийных ситуаций. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2017. 70 с.
4. Aleksandrov P., Kalechits V., Khozyasheva E., Shakhov M. Ultrafine Particles Monitoring and Early Detection of Emergency. LAP Lambert Academic Publishing, 2018. 64 p.
5. Александров П.А., Александрова А.В., Антонов Е.А., Ильин В.К., Калечиц В.И., Ковбасюк И.Е., Лашенцова Е.А., Маслаков О.Ю., Притчина Е.С., Усанова Н.А., Хозяшева Е.С., Шахов М.Н. Исследование динамики накопления аэрозолей и спор микроскопических грибов в воздушной среде герметичного обитаемого объекта в условиях четырёхмесячного изоляционного эксперимента SIRIUS-19 // Биотехнология. 2020. Т. 36. № 6. С. 138–148. EDN: HDBCYK.
6. Кирий А.Р., Шеф К.А., Александрова А.В., Антонов Е.А., Ковбасюк И.Е., Зарипов Р.Н., Поддубко С.В. Санитарно-микробиологический мониторинг среды обитания членов экипажа наземного изоляционного эксперимента SIRIUS-23 // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2025. Т. 59. № 2. С. 12–19. EDN: SHSBUR. <http://doi.org/10.21687/0233-528X-2025-59-2-12-19>.
7. Napoli C., Marcotrigiano V., Montagna M.T. Air sampling procedures to evaluate microbial contamination: a comparison between active and passive methods in operating theatres // BMC Public Health. 02 August 2012. V. 12. Article № 594. <http://doi.org/10.1186/1471-2458-12-594>.
8. 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. V. 54. № 2. P. 112–116.

9. Stålfelt F., Malchau K.S., Björn C., Mohaddes M., Andersson A.E. Can particle counting replace conventional surveillance for airborne bacterial contamination assessments? A systematic review using narrative synthesis // *American Journal of Infection Control*. 2003. V. 51. № 12. P. 1417–1424. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2023.05.004>.
10. Tham K.W., Zuraimi M.S. Size relationship between airborne viable bacteria and particles in a controlled indoor environment study // *Indoor Air*. 2005. 15 (Suppl 9): 48–57. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00303.x>.
11. Wagner J., Macher J. Automated spore measurement using microscopy, image analysis and peak recognition of near-monodisperse aerosols // *Aerosol Science and Technology*. 2012. V. 46. № 8. P. 862–873. <https://doi.org/10.1080/02786826.2012.674232>.
12. Kelly J. Selecting Portable and Automated Air Sampler Devices to Meet cGMP / Cleanroom Technology. V.3-2017.
13. Soler-Hurtado M.M., Sandoval-Sierra J.V., Machordom A., Diéguez-Uribeondo J. *Aspergillus sydowii* and other potential fungal pathogens in gorgonian octocorals of the Ecuadorian Pacific // *PLoS ONE*. 2016. 11 (11): e0165992. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165992>.
14. Hongjuan Zhang, Mengying He, Xin Fan, Lu Dai, Shan Zhang, Zeyu Hu, Ning Wang. Isolation, identification and hyperparasitism of a novel *Cladosporium cladosporioides* isolate hyperparasitic to *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the Wheat Stripe Rust Pathogen // *Biology*. 2022. V. 11. № 6. 892. <https://doi.org/10.3390/biology11060892>.
15. Tingfei Sun, Jianhui Wu, Shaikat Ali. Morphological and molecular identification of four *Purpleocillium* isolates and evaluating their efficacy against the sweet potato whitefly, *Bemisia tabaci* (Genn.) (Hemiptera: Aleyrodidae) // *Egyptian Journal of Biological Pest Control*. 2021. V. 31. Article № 27. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00372-y>.
16. Andersen A.A. New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles // *Journal of Bacteriology*. 1958. V. 76. № 5. P. 471–484. <http://doi.org/10.1128/jb.76.5.471-484.1958>.
17. Macher J.M. Positive-hole correction of multiple-jet impactors for collecting viable microorganisms // *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1989. V. 50. № 11. P. 561–568. <https://doi.org/10.1080/15298668991375164>.
18. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. 2-е изд., стер. Т. 1. М.: Мир, 1967. С. 230.

References

1. Whyte W. Cleanroom Technology: Fundamentals of Design, Testing and Operation. Moscow: Research and Production Center “Cleanroom Instruments”; 2023. P. 29–42. (In Russ.)
2. Axel-Rubinstein V.Z. Sanitary Chemistry of the Atmosphere of Hermetic Objects. St. Petersburg: LLC “Press-Service”; 2010. 354 p. (In Russ.)
3. Aleksandrov P.A., Kalechits V.I., Khozyasheva E.S. Ultrafine Particle Monitoring and Early Warning of Emergency and Pre-Emergency Situations. Moscow: National Research Centre “Kurchatov Institute”; 2017. 70 p. (In Russ.)

4. Aleksandrov P., Kalechits V., Khozyasheva E., Shakhov M. Ultrafine Particles Monitoring and Early Detection of Emergency. LAP Lambert Academic Publishing; 2018. 64 p.
5. Aleksandrov P.A., Aleksandrova A.V., Antonov E.A., Ilyin V.K., Kalechits V.I., Kovbasyuk I.E., Lashchenova E.A., Maslakov O.Yu., Pritchina E.S., Usanova N.A., Khozyasheva E.S., Shakhov M.N. 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. *Biotehnologiya*. 2020; 36 (6): 138–148. EDN: HDBCYK. (In Russ.)
6. Kiriy A.R., Shef K.A., Aleksandrova A.V., Antonov E.A., Kovbasyuk I.E., Zaripov R.N., Poddubko S.V. Sanitary-microbiological monitoring of the environment in the SIRIUS-23 isolation study. *Aerospace and Environmental Medicine*. 2025; 59 (2): 12–19. EDN: SHSBUR. <http://doi.org/10.21687/0233-528X-2025-59-2-12-19>. (In Russ.)
7. Napoli C., Marcotrigiano V., Montagna M.T. Air sampling procedures to evaluate microbial contamination: a comparison between active and passive methods in operating theatres. *BMC Public Health*. August 02, 2012; 12: 594. <http://doi.org/10.1186/1471-2458-12-594>.
8. 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.
9. Stålfelt F., Malchau K.S., Björn C., Mohaddes M., Andersson A.E. Can particle counting replace conventional surveillance for airborne bacterial contamination assessments? A systematic review using narrative synthesis. *American Journal of Infection Control*. 2003; 51 (12): 1417–1424. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2023.05.004>.
10. Tham K.W., Zuraimi M.S. Size relationship between airborne viable bacteria and particles in a controlled indoor environment study. *Indoor Air*. 2005; 15 (Suppl 9): 48–57. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00303.x>.
11. Wagner J., Macher J. Automated spore measurement using microscopy, image analysis and peak recognition of near-monodisperse aerosols. *Aerosol Science and Technology*. 2012; 46 (8): 862–873. <https://doi.org/10.1080/02786826.2012.674232>.
12. Kelly J. Selecting Portable and Automated Air Sampler Devices to Meet cGMP / Cleanroom Technology. V.3-2017.
13. Soler-Hurtado M.M., Sandoval-Sierra J.V., Machordom A., Diéguez-Uribeondo J. *Aspergillus sydowii* and other potential fungal pathogens in gorgonian octocorals of the Ecuadorian Pacific. *PLoS ONE*. 2016; 11 (11): e0165992. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165992>.
14. Hongjuan Zhang, Mengying He, Xin Fan, Lu Dai, Shan Zhang, Zeyu Hu, Ning Wang. Isolation, identification and hyperparasitism of a novel *Cladosporium cladosporioides* isolate hyperparasitic to *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the Wheat Stripe Rust Pathogen. *Biology*. 2022; 11 (6): 892. <https://doi.org/10.3390/biology11060892>.
15. Tingfei Sun, Jianhui Wu, Shaukat Ali. Morphological and molecular identification of four *Purpureocillium* isolates and evaluating their efficacy against the sweet potato whitefly, *Bemisia tabaci* (Genn.) (Hemiptera: Aleyrodidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*. 2021; 31: 27. <https://doi.org/10.1186/s41938-021-00372-y>.
16. Andersen A.A. New sampler for the collection, sizing, and enumeration of viable airborne particles. *Journal of Bacteriology*. 1958; 76 (5): 471–484. <http://doi.org/10.1128/jb.76.5.471-484.1958>.

17. Macher J.M. Positive-hole correction of multiple-jet impactors for collecting viable microorganisms. *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1989; 50 (11): 561–568. <https://doi.org/10.1080/15298668991375164>.
18. Feller W. *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*. 2nd ed., revised. V. 1. Moscow: Mir; 1967. P. 230. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 26.05.2026; одобрена после рецензирования 26.05.2026; принята к публикации 27.05.2026.

The article was submitted 26.05.2026; approved after reviewing 26.05.2026; accepted for publication 27.05.2026.