

# КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ ГЕРМЕТИЧНОГО ПОМЕЩЕНИЯ В ЧЕТЫРЕХМЕСЯЧНОМ ИЗОЛЯЦИОННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ SIRIUS-19

Александров П.А.,  
Калечиц В.И.,  
Ковбасюк И.Е.,  
Маслаков О.Ю.,  
Притчина Е.С.,  
Хозяшева Е.С.,  
Шахов М.Н.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Специалистам по технологии чистоты хорошо известно, что в воздушной среде любого замкнутого помещения – в промышленном цехе, концертном зале, офисе, квартире – накопление микрозагрязнений на несколько порядков превышает аналогичный процесс в помещениях с организованным воздухообменом и системой воздухоочистки (за счет застойных зон и генерации аэрозолей внутри помещения) [1-2]. Из всего множества замкнутых помещений выделяется особая группа – полностью герметичные обитаемые помещения, у которых отсутствует контакт с атмосферой (но, разумеется, есть система воздухоподготовки для поддержания жизнедеятельности находящихся внутри людей). Наиболее типичными 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 система воздухоподготовки обеспечивает

степень очистки воздуха на уровне классов ИСО 7 – ИСО 9, но, с другой стороны, присутствие людей и их деятельность приводят к быстрому накоплению в воздухе загрязнений вплоть до опасного для здоровья уровня (в отличие от чистых производственных помещений, где загрязнения угрожают, прежде всего, производимой в помещении продукции). Впрочем, 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 [4-5].

## Четырехмесячный изоляционный эксперимент SIRIUS-19

В 2019 г. Институт медико-биологических проблем РАН (ИМБП РАН) начал серию наземных экспериментов SIRIUS



Рис. 1. Эмблема международного четырехмесячного изоляционного эксперимента SIRIUS-19 (Scientific International Research in Unique Terrestrial Station)

с длительной изоляцией экспериментальных экипажей в макетах, имитирующих пребывание на МКС, а также нацеленных на перспективные длительные космические полеты.

Эксперимент SIRIUS (Scientific International Research In Uniqueterrestrial Station) проводится совместно ИМБП РАН и национальным аэрокосмическим агентством НАСА (США). Первый этап – 120-ти суточный изоляционный эксперимент SIRIUS-19 состоялся 19.03–19.07.2019 г. в наземном экспериментальном комплексе ИМБП и воспроизводит основные временные характеристики реального космического полета на Луну: перелет до спутника с последующим облетом для поиска места приземления, приземление четырех членов экипажа для проведения операций на поверхности, возвращение на Землю.

Команда (экипаж) эксперимента SIRIUS-19 состояла

из 6 человек – трех мужчин и трех женщин, изолированных от внешнего мира в наземном экспериментальном комплексе ИМБП в течение 120 дней. Главной целью эксперимента SIRIUS-19 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 использовалась пятиминутная задержка связи с экипажем, аналогичная задержке при реальном полете на Луну.

Научная программа эксперимента включала 78 подпрограмм исследований по физиологии, психологии, микробиологии, а также по технологическим аспектам пребывания в герметичном пространстве. 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 подпрограммы являлось применение к замкнутой воздушной среде герметичных объектов отработанных в технологии чистых производственных помещений методов оценки уровня аэрозольного загрязнения воздуха с помощью счетчиков частиц аэрозолей.

### Методика проведения измерений

В ходе эксперимента экипаж выполнял задачи ежедневного медицинского контроля и углубленной оценки состояния здоровья, контроля двигательной активности и проведения регулярных физических тренировок экипажа. Проведение научных экспериментов было распределено между членами экипажа.

Проведение измерений по динамике накопления аэрозо-



Рис. 2. Рейнхольд Повилайтис во время измерений аэрозолей в помещении оранжереи НЭК



Рис. 3. Медико-технологический наземный экспериментальный комплекс ИМБП

лей было поручено Рейнхолду Повилайтису (Reinhold Povilaitis, США). Рейнхолд Повилайтис – аналитик исследований и операций на лунном разведывательном орбитальном аппарате. Он окончил Университет штата Аризона со степенью магистра в области материаловедения и сертификатом выпускника в области атомной энергетики.

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 были выбраны три помещения основной деятельности экипажа – комната отдыха, тренажерный зал и оранжерея, замеры в которых проводились поочередно.

Измерения выполнялись с помощью ручного счетчика аэрозолей Handheld 3016 IAQ, производства Lighthouse (США) (рис. 2) в течение всего эксперимента, точнее с 23.03 по 14.07, с небольшим техническим пере-

рывом в апреле (14-18.04), связанным с заменой кабеля связи прибора и компьютера.

Счетчик программировался один раз в сутки таким образом, чтобы замеры проводились каждые 15 минут круглые сутки. При каждом измерении длительностью 1 минута отбиралась проба в 2,8 л. При этом проба разбавлялась в 10 раз чистым воздухом, пришедшим через «абсолютный» (мембранный) воздушный фильтр.

Измерялась счетная концентрация частиц размером 0,3 / 0,5 / 1 / 2,5 / 5 / 10 мкм. По результатам измерений прибор также вычислял значения PM 0,5 / PM 1 / PM 2,5 / PM 5 / PM 10 / TPM. Одновременно со счетной концентрацией частиц измерялась температура и относительная влажность воздуха.

### Краткое изложение результатов измерений

На протяжении всего эксперимента отчетливо фиксировалась связь концентрации частиц и активности членов экипажа. Менее четко эта связь прослеживается при мониторинге комнаты отдыха, поскольку в ней часто находилось

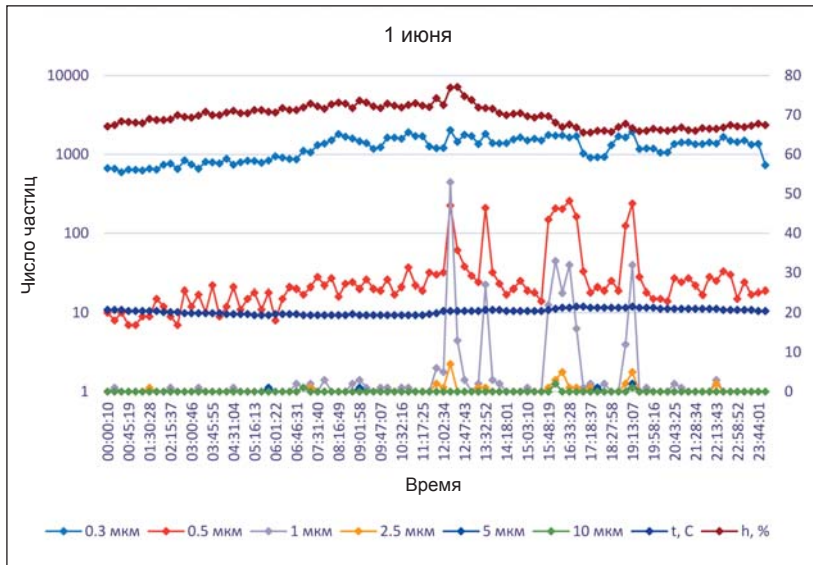
от одного до шести человек, и колебания концентрации при изменении численности в значительной степени сглаживались. В целом же концентрация частиц в комнате отдыха менялась в течение дня в широких пределах – от несоответствия гигиеническим нормам ВОЗ (см. ниже) до классов ИСО 7 и ИСО 8 (в ночные часы).

В тренажерном зале резкое повышение концентрации частиц во всех размерных диапазонах фиксировалось очень четко (рис. 4), тем более что пребывание членов экипажа (но не более двух одновременно) в этом помещении всегда сопровождалось активными физическими действиями. Также следует отметить, что в отсутствие людей чистота воздуха в тренажерном зале соответствовала классу ИСО 7.

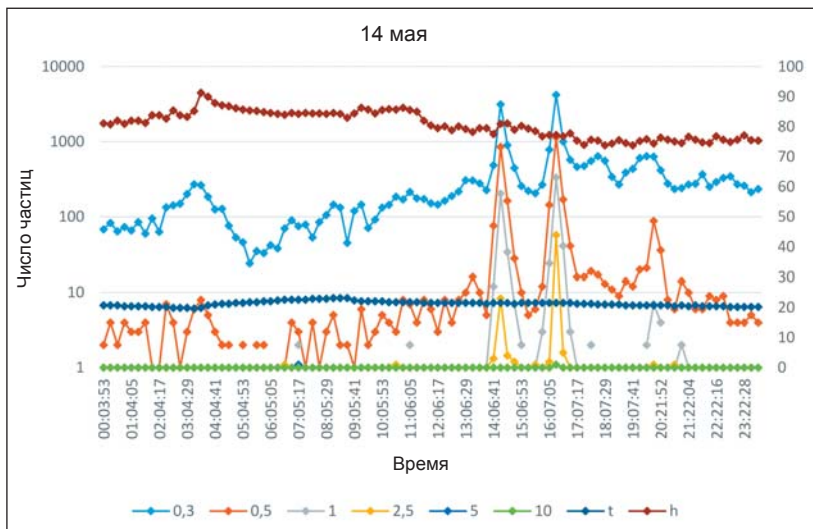
Не менее отчетливо по резкому (на порядок и более) повышению концентрации частиц во всех размерных диапазонах регистрировалось появление членов экипажа в оранжерее (рис. 5), где в отсутствие людей концентрации частиц были невысоки (соответствовали классу ИСО 7).

Характерно, что, как это иллюстрируют рис. 4-5, появление в помещении членов экипажа и (или) их физическая активность сопровождаются ростом счетной концентрации частиц во всех размерных диапазонах, включая крупные (диаметром более 1 мкм) частицы. Очевидно, что это фундаментальное отличие обычного («бытового») роста концентрации частиц от роста концентрации частиц из-за возникновения какой-либо нештатной или аварийной ситуации, для которых, как правило, характерно образование частиц в каком-либо отдельном размерной диапазоне. Отме-





**Рис. 4.** Пример результатов измерений, проведенных в тренажерном зале в течение суток, – зависимость от времени счетной концентрации частиц различного диаметра в течение 1 июня 2019 г. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат (слева) – число частиц, справа – температура (в градусах Цельсия) и величина относительной влажности (в процентах). Соответствие размера частиц (в мкм) и цвета графика указано внизу; там же указан цвет графиков относительной влажности (h) и температуры воздуха (t)



**Рис. 5.** Пример результатов измерений, проведенных в оранжерее в течение суток, – зависимость от времени счетной концентрации частиц различного диаметра в течение 14 мая 2019 г. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат (слева) – число частиц, справа – температура (в градусах Цельсия) и величина относительной влажности (в процентах). Соответствие размера частиц (в мкм) и цвета графика указано внизу; там же указан цвет графиков относительной влажности (h) и температуры воздуха (t)

тим, что моделирование аварийных или предаварийных ситуаций не входило в программу экспериментов SIRIUS-19.

Следует отметить очень высокую влажность практически

в течение всего эксперимента, причем величина влажности нарастала со временем. Это относится именно к жилым помещениям (к комнате отдыха и тренажерному залу; для оран-

жереи повышенная влажность является нормой).

Так, в марте 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 %), а в июле отмечены очень высокие значения влажности как в комнате отдыха и тренажерном зале (85–90 %), так и в оранжерее (до 100 %).

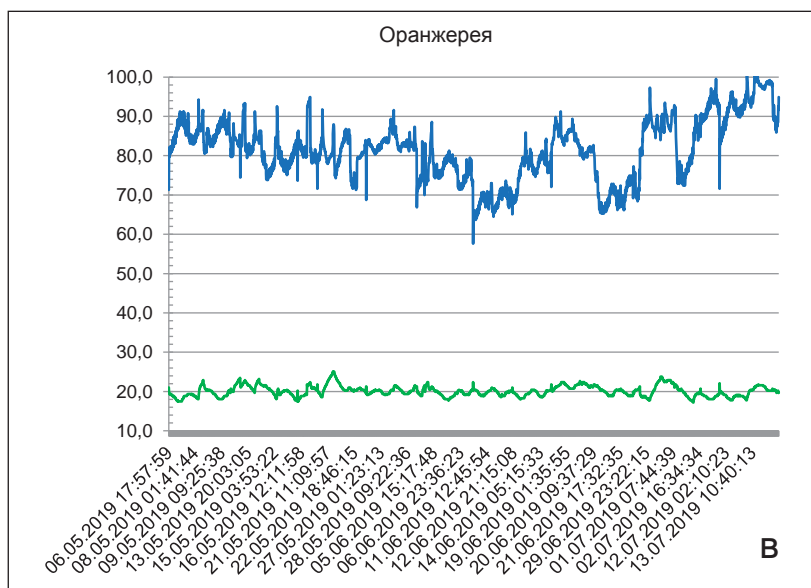
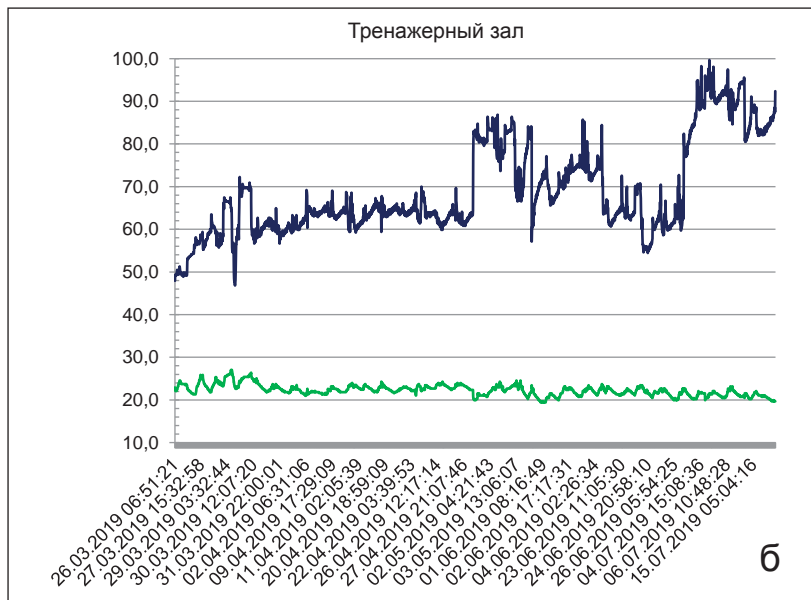
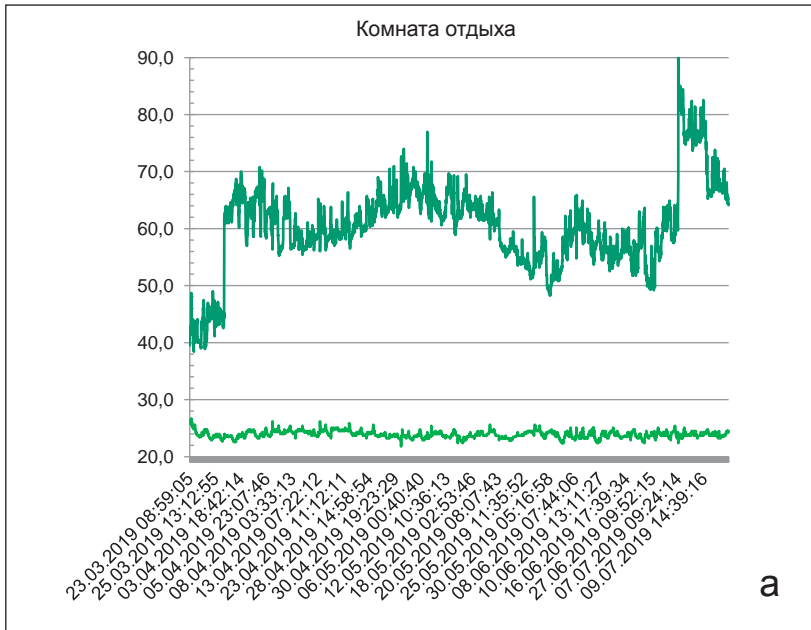
Другими словами, значения относительной влажности в помещениях почти всегда превышали как рекомендации ГОСТ Р 30494-96 для теплого времени года (30–45 %, max 60 %), так и значения физиологической нормы (40–60 %).

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 массовой концентрации частиц PM<sub>0,5</sub> / PM<sub>1</sub> / PM<sub>2,5</sub> / PM<sub>5</sub> и PM<sub>10</sub> (PM X – particulate matter – масса всех частиц с размером менее X мкм).

Особое внимание при анализе чистоты воздуха в последнее время вызывают значения показателя PM<sub>2,5</sub>, поскольку эта величина соответствует размерам аэрозольных частиц, способных преодолеть т.н. аэрогематический барьер, т.е. попадать в кровь. Величина PM<sub>2,5</sub> в воздухе регламентируется национальными законодательными актами, а также Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ).

В счетчике Handheld 3016 IAQ величина PM<sub>2,5</sub> оцени-



вается на основании полученных данных о счетной концентрации по формуле:

$$M = \frac{\pi}{6} \cdot k \cdot N \cdot d^3 \cdot \rho \cdot 10^6,$$

где

$M$  – массовая концентрация частиц (мкг/м<sup>3</sup>);

$N$  – концентрация частиц (1/л);

$d$  – размер частиц (мкм);

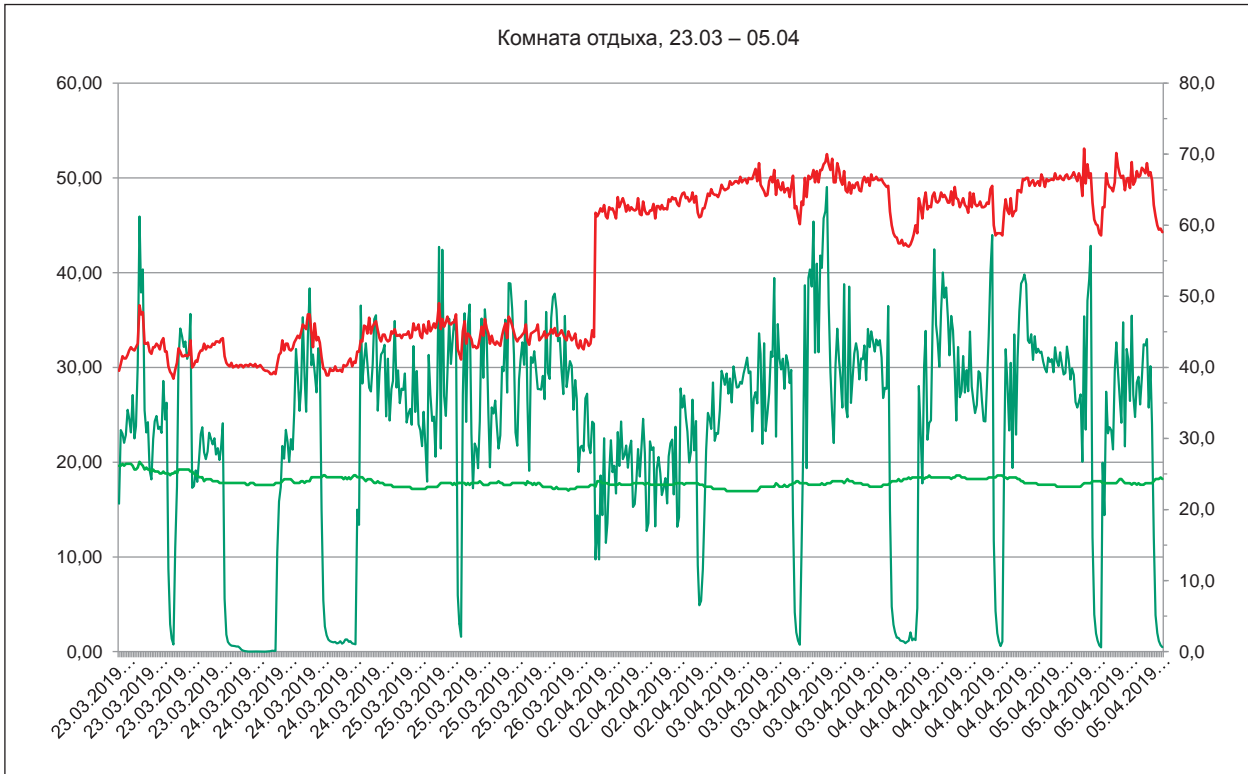
$\rho$  – плотность (мкг/мл).

Нетрудно видеть, что  $PM_{2.5} = M$  (масса всех частиц в диапазоне 0,3-0,5 мкм) +  $M(0,5-1)$  +  $M(1-2,5)$ .

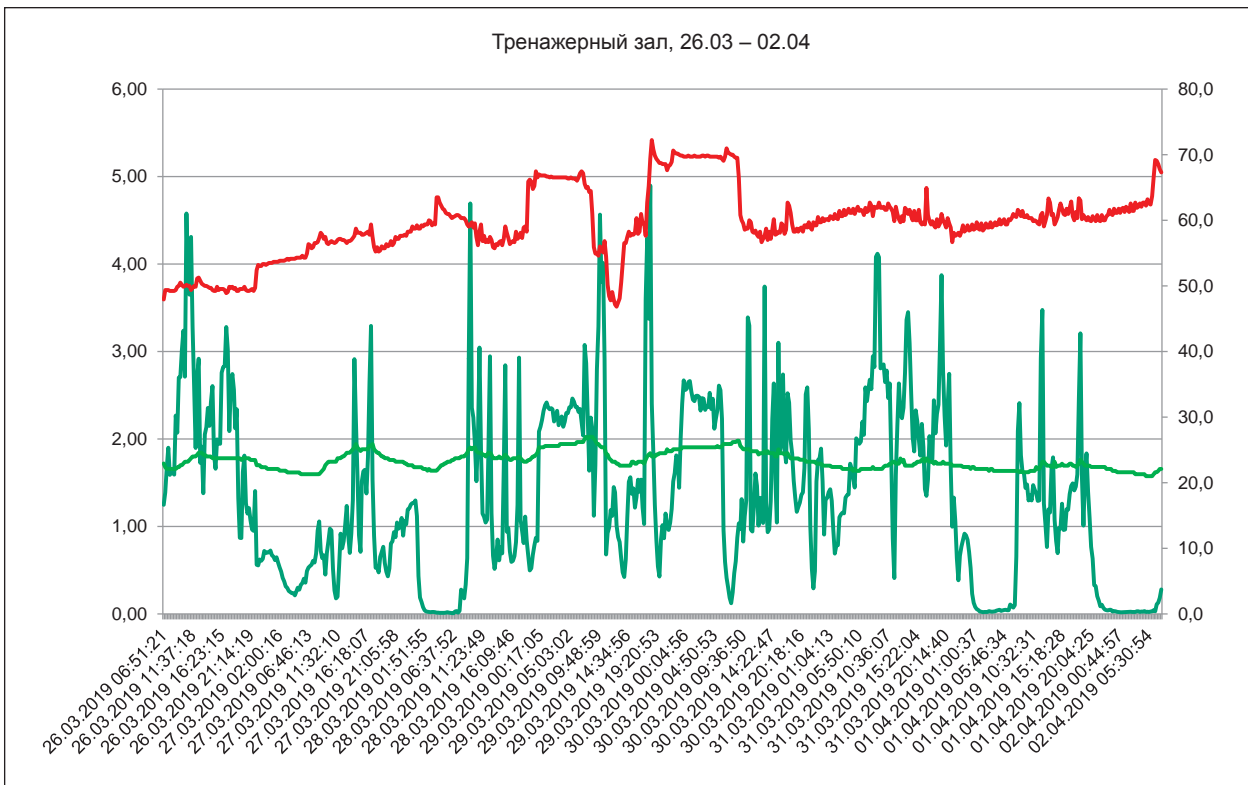
На фоне высокой влажности четко проявляются эффекты влияния изменения величины влажности на счетную и массовую ( $PM_{2,5}$ ) концентрацию частиц, что иллюстрируется графиками мониторинга  $PM_{2,5}$  и влажности на рис. 7 и 8. С ростом влажности концентрация частиц увеличивается, и наоборот, причем 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 фиксировалось значительное (в разы) превышение максимальной разовой концентрации частиц  $PM_{2,5}$  (160 мкг/м<sup>3</sup>). Например, в марте месяце в комнате отдыха в присутствии членов экипажа максимальная разовая концентрация частиц  $PM_{2,5}$  была повышена практически всегда, но она ни разу

**Рис. 6.** Графики значений относительной влажности (верхняя кривая) и температуры (нижняя кривая) в помещениях комнаты отдыха (а), тренажерного зала (б) и оранжереи (в) на протяжении всего эксперимента. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат – температура (в градусах Цельсия) и величина относительной влажности (в процентах)



**Рис. 7.** Графики значений относительной влажности (верхняя кривая красного цвета), температуры (нижняя кривая светло-зеленого цвета) и значения PM 2,5 (ломаная кривая бирюзового цвета) в комнате отдыха в период с 23.03 по 05.04.2019 г. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат – численные значения для температуры (в градусах Цельсия), величины относительной влажности (в процентах) и для PM 2,5 (в мкг/м<sup>3</sup>)



**Рис. 8.** Графики значений относительной влажности (верхняя кривая красного цвета), температуры (светло-зеленого цвета) и значения PM 2,5 (ломаная кривая бирюзового цвета) в помещении тренажерного зала в период с 26.03 по 02.04.2019 г. По оси абсцисс отложено текущее время, по оси ординат – численные значения для температуры (в градусах Цельсия), величины относительной влажности (в процентах) и для PM 2,5 (в мкг/м<sup>3</sup>)



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/м<sup>3</sup>), как правило, не превышались. Среднесуточные максимальные значения PM 2,5 по нормативам ВОЗ (25 мкг/м<sup>3</sup>) в некоторых случаях были превышены.

Из изложенного выше можно сделать вывод, что система очистки воздуха в изолированном герметичном модуле во время эксперимента SIRIUS-19 не была рассчитана на большое число членов экипажа. Из измерений видно, что система очистки воздуха отлично работала в отсутствие людей, но не справлялась при их появлении. Доработка системы очистки воздуха герметичного модуля является одной из основных рекомендаций для будущих запланированных экспериментов SIRIUS.

В целом можно констатировать, что поставленные в программе эксперимента задачи выполнены. Следует отметить большую информационную цен-

ность 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 подчеркнутая в программе цель на данном этапе работ – обоснована целесообразность включения ручного лазерного счетчика аэрозольных частиц в состав комплекта научных приборов на борту космического корабля и экспериментально продемонстрирована высокая информативность получаемых с его помощью данных.

Оказалась нереализованной лишь 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 ими-

таторе лунной поверхности была заменена виртуальной.

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

*Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказы № 1502 от 11.09.2017 и № 1807 от 14.08.2019 г.).*

### Список использованной литературы:

1. Чистые помещения. Под ред. И. Хаякавы. М.: «Мир», 1990. 456 с.
2. В. Уайт. Технология чистых помещений, испытаний и эксплуатации. М.: Изд. «Клинрум». 2002. 304 с.
3. В.З. Аксель-Рубинштейн. Санитарная химия атмосферы гермообъектов. СПб., 2010. 354 с.
4. В.И. Калечиц. Современные направления в контроле аэрозольных микрозагрязнений. «Чистые помещения и технологические среды», 2002, № 1, стр. 16-21.
5. П.А. Александров, В.И. Калечиц, Е.С. Хозяшева, М.Н. Шахов. Мониторинг ультрадисперсных частиц и раннее предупреждение аварийных и предаварийных ситуаций. М.: НИЦ «Курчатовский институт». 2017. 72 с. ■



ИСПЫТАНИЯ  
ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ



ВАЛИДАЦИЯ  
ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА



КВАЛИФИКАЦИЯ СКЛАДОВ  
И ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



КВАЛИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
И ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ



РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ  
АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДИК



КОНСУЛЬТАЦИИ, АУДИТ,  
РАЗРАБОТКА ДОКУМЕНТОВ

академлаб®  
Ваш надежный партнер  
в обеспечении качества

академлаб  
независимая лаборатория

+ 7 906 996 68 47  
mail@academlab.ru  
www.academlab.ru