

DOI: 10.21055/0370-1069-2023-2-134-139

УДК 616.98:578.834.1:614.48

Д.Н. Масыкин¹, А.Е. Алферов¹, С.Г. Кикоть², И.А. Андрощук¹, В.Б. Кириллов¹, С.Л. Кириллова¹,
Е.А. Ковальчук¹, М.А. Котов³, В.А. Лопота⁴, И.Г. Рудой⁵, Н.Г. Соловьев³, А.М. Сорока⁵,
В.В. Труфанова¹, Н.Я. Чепуренков¹, А.Н. Шемякин³, М.Ю. Якимов³, С.В. Борисевич¹

Обеззараживание поверхностей, загрязненных коронавирусом SARS-CoV-2, ультрафиолетовым излучением ртутной лампы низкого давления

¹ФГБУ «48 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации, Сергиев Посад, Российская Федерация; ²Управление начальника войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации, Москва, Российская Федерация; ³ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; ⁴ФГАНУ «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ⁵Инновационная научно-технологическая компания «ПроТек», Москва, Российская Федерация

Целью работы явилось определение эффективных ультрафиолетовых (УФ) доз, необходимых для обеззараживания загрязненных коронавирусом SARS-CoV-2 поверхностей, при использовании ртутной лампы низкого давления. **Материалы и методы.** Для проведения оперативной дезинфекции поверхностей использован специально разработанный источник УФ-излучения мощностью 7,5 Вт с длиной волны 254 нм в форме портативного фонаря, который обладает высокой эффективностью выхода УФ-излучения и возможностью длительной работы в автономном режиме от компактной батареи. В исследованиях использовали суспензионную культуру коронавируса SARS-CoV-2 с биологической активностью $5,3 \cdot 10^6$ БОЕ/мл. Объектами тестирования служили пластиковые чашки Петри (одноразовые) и офисная бумага (марка С, плотность 80 г/м²). **Результаты и обсуждение.** Определены дозы УФ-излучения, обеспечивающие дезинфекцию поверхностей, загрязненных возбудителем COVID-19, с эффективностью от 99,0 % (бумага) до 99,95 % (пластик). Полученные результаты позволяют рекомендовать портативный УФ-облучатель для использования в практике профилактических мероприятий по борьбе с распространением заболевания, вызванного коронавирусом SARS-CoV-2.

Ключевые слова: дезинфекция, коронавирус SARS-CoV-2, УФ-излучение.

Корреспондирующий автор: Борисевич Сергей Владимирович, e-mail: 48nii@mail.ru.

Для цитирования: Масыкин Д.Н., Алферов А.Е., Кикоть С.Г., Андрощук И.А., Кириллов В.Б., Кириллова С.Л., Ковальчук Е.А., Котов М.А., Лопота В.А., Рудой И.Г., Соловьев Н.Г., Сорока А.М., Труфанова В.В., Чепуренков Н.Я., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю., Борисевич С.В. Обеззараживание поверхностей, загрязненных коронавирусом SARS-CoV-2, ультрафиолетовым излучением ртутной лампы низкого давления. Проблемы особо опасных инфекций. 2023; 2:134–139. DOI: 10.21055/0370-1069-2023-2-134-139

Поступила 31.08.2022. Отправлена на доработку 23.01.2023. Принята к публ. 19.05.2023.

D.N. Masyakin¹, A.E. Alferov¹, S.G. Kikot'², I.A. Androshchuk¹, V.B. Kirillov¹, S.L. Kirillova¹,
E.A. Koval'chuk¹, M.A. Kotov³, V.A. Lopota⁴, I.G. Rudoy⁵, N.G. Solov'ev³, A.M. Soroka⁵,
V.V. Trufanova¹, N.Ya. Chepurenkov¹, A.N. Shemyakin³, M.Yu. Yakimov³, S.V. Borisevich¹

Disinfection of Surfaces Contaminated with SARS-CoV-2 Coronavirus by UV Radiation of Low-Pressure Mercury-Vapour Lamp

¹48th Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Sergiev Possad, Russian Federation;

²Directorate of the Chief of Radiation, Chemical and Biological Protection Troops of the Armed Forces of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation;

³Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;

⁴Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg, Russian Federation;

⁵Innovative Scientific and Technological Company "ProTech", Moscow, Russian Federation

Abstract. The aim of the work was to determine the effective ultraviolet (UV) doses required for the disinfection of surfaces contaminated with the SARS-CoV-2 coronavirus using a low-pressure mercury lamp. **Materials and methods.** To carry out prompt disinfection of surfaces, a specially designed source of UV radiation with a power of 7.5 W at a wavelength of 254 nm in the form of a portable flashlight was employed, which has a high efficiency of UV radiation output and the possibility of long-term autonomous operation from a compact battery. In the studies, a suspension culture of the SARS-CoV-2 coronavirus with biological activity of $5.3 \cdot 10^6$ PFU/ml was used. The objects of testing were plastic Petri dishes (disposable) and office paper (grade C, density 80 g/m²). **Results and discussion.** Doses of UV radiation that provide disinfection of surfaces contaminated with the COVID-19 pathogen with an efficiency of 99.0 % (paper) to 99.95 % (plastic) have been determined. The results obtained make it possible to recommend a portable UV irradiator for use in the practice of preventive measures to combat the spread of the disease caused by the SARS-CoV-2 coronavirus.

Key words: disinfection, SARS-CoV-2 coronavirus, UV radiation.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Funding: The authors declare no additional financial support for this study.

Corresponding author: Sergey V. Borisevich, e-mail: 48nii@mail.ru.

Citation: Masyakin D.N., Alferov A.E., Kikot' S.G., Androshchuk I.A., Kirillov V.B., Kirillova S.L., Koval'chuk E.A., Kotov M.A., Lopota V.A., Rudoy I.G., Solov'ev N.G., Soroka A.M., Trufanova V.V., Chepurenkov N.Ya., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu., Borisevich S.V. Disinfection of Surfaces Contaminated with SARS-CoV-2 Coronavirus by UV Radiation of Low-Pressure Mercury-Vapour Lamp. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]*. 2023; 2:134–139. (In Russian). DOI: 10.21055/0370-1069-2023-2-134-139

Received 31.08.2022. Revised 23.01.2023. Accepted 19.05.2023.

Androshchuk I.A., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8993-3151>

Kirillov V.B., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2916-0668>

Kirillova S.L., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1245-9225>

Koval'chuk E.A., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7279-196X>

Kotov M.A., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5523-0300>

Lopota V.A., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8342-1967>

Yakimov M.Yu., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0877-7637>

Borisevich S.V., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6742-3919>

Распространение новой коронавирусной инфекции COVID-19, достигшее согласно определению Всемирной организации здравоохранения уровня пандемии, вошло в историю как чрезвычайная ситуация мирового масштаба и привлекло к себе внимание специалистов здравоохранения и населения во всех странах. Основными путями распространения COVID-19 являются воздушно-капельный и контактный. Важной особенностью коронавируса SARS-CoV-2 является достаточно продолжительное (от 8–10 часов до нескольких суток) сохранение его жизнеспособности в воздухе и на различных поверхностях [1–5].

Возможность инактивации вируса SARS-CoV-2 с помощью различных химических реагентов [6, 7], а также физических методов воздействия, прежде всего ультрафиолетовым (УФ) излучением [3], была показана в течение 2020 г.

Воздействие УФ-излучением диапазона 220–290 нм является хорошо известным и эффективным способом деструкции всех биологических патогенов (бактерий, вирусов, спор и т.д.) [8, 9].

Эксперименты по воздействию УФ-излучением на представителя семейства коронавирусов (вирус мышинного гепатита, *murine hepatitis virus* [MHV] *coronavirus*) были проведены впервые в 1978 г. Для выживаемости 10,0 и 0,1 % вирусной популяции УФ-дозы составили 1,5 и 5 мДж/см² соответственно [10].

Спустя 10 лет было выявлено, что воздействие излучения ртутной лампы низкого давления (РЛНД) с длиной волны 254 нм и мощностью 15 Вт на расположенные в 1 м от излучателя чашки Петри диаметром 9 см с образцами коронавирусов животных обеспечивает за 15 минут уровень дезинфекции выше 99,9 % [11]. Оценка УФ-дозы для этих условий составила около 200 мДж/см² [10]. Параметры облучения для инактивации MHV в аэрозолях при использовании РЛНД оказались достаточно низкими: выживаемость 12,2 % соответствовала вирулицидной дозе 0,6 мДж/см² [12].

Исследования УФ-дезинфекции, которая может быть как эффективной, так и технологичной, активно проводились в 2020 г. с вирусом SARS-CoV-2. Применялось не только излучение РЛНД с длиной волны 254 нм [13–15], но и более «экзотические» источники света УФ-диапазона, включая светодиоды с длиной волны 280 нм [16] и эксимерную лампу с длиной волны излучения 222 нм [17]. Для одного и того же уровня дезинфекции (99,9 %) был отмечен значительный разброс использованных доз: от 5 до 6 мДж/см² [13], 20 мДж/см² [15] и даже 1000 мДж/см² [14].

Значительное расхождение указанных результатов может иметь разные причины. Вероятно, здесь необходимо учитывать корректность определения интенсивности УФ-излучения и, прежде всего, методику, надежность и точность определения выживаемости вирусов (с учетом изменения их титра со временем безотносительно к облучению и обнаруженной зависимости результатов от влажности образцов) [13]. Необходимо учитывать возможную зависимость величины эффективной УФ-дозы от конкретного штамма вируса. Так, для облучения коронавирусов человека α -HCoV-229E и β -HCoV-OC43 на длине волны 222 нм эффективные дозы отличаются в 1,5 раза [18], при этом для близкого по генотипу к SARS-CoV-2 коронавируса β -HCoV-OC43 эффективная УФ-доза оказалась втрое ниже, чем для SARS-CoV-2 [17]. Кроме того, существенное влияние на результаты дезинфекции может оказывать состояние поверхности-носителя облучаемого биологического объекта.

Следует отметить, что за последние годы РЛНД кардинально увеличили свою экологическую безопасность за счет применения в качестве источника атомов ртути ртутной амальгамы с пренебрежительно малым давлением паров ртути при комнатной температуре.

Целью работы явилось определение эффективных УФ-доз, необходимых для обеззараживания контаминированных коронавирусом SARS-CoV-2 поверхностей, при использовании ртутной лампы низкого давления.

Материалы и методы

В экспериментах использовался специально разработанный источник УФ-излучения на основе компактной U-образной РЛНД (Osram Puritec HNS S/E 7W 2G7 с электронным балластом). Мощность, потребляемая лампой от сети, не превышала 7,5 Вт. Для эффективного сбора и формирования направленности вирулицидного излучения в сторону облучаемых образцов лампа устанавливалась в полости из материала с высоким (не менее 90 %) коэффициентом диффузного отражения. Излучение выводилось из полости через круглое торцевое отверстие диаметром 97 мм при длине полости 130 мм. Взаимное расположение УФ-излучателя и облучаемого объекта, находящегося в ходе исследования на расстоянии h от выходной апертуры источника, показано на рис. 1. Вследствие многократных отражений от диффузно отражающей поверхности пространственное распределение интенсивности УФ-излучения было

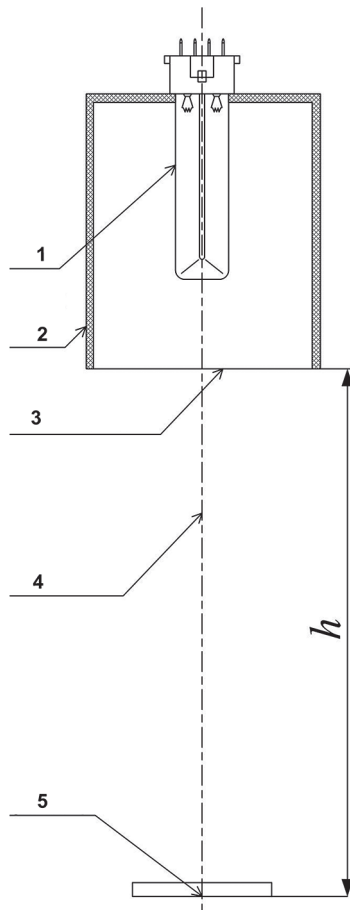


Рис. 1. Взаимное расположение вирулицидного излучателя и облучаемого объекта:
 1 – УФ-лампа; 2 – диффузный отрагатель; 3 – выходная апертура; 4 – оптическая ось; 5 – образец

Fig. 1. Mutual arrangement of the virucidal emitter and the irradiated object:
 1 – UV lamp; 2 – diffuse reflector; 3 – output aperture; 4 – optical axis; 5 – sample

гладким и однородным в плоскости выходной апертуры и при распространении в направлении облучаемых образцов. Изменение интенсивности излучения в плоскости выходной апертуры составило не более 6 % относительно среднего значения при полной мощности потока излучения 715 мВт, с которой проводились исследования.

Разработка портативного излучателя проводилась с учетом требований к медицинским изделиям и электробезопасности в соответствии с п. 2.7 Руководства Р 3.5.1904-04, утвержденного и введенного в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 04.03.2004.

Распределение интенсивности излучения на длине волны 254 нм в плоскости выходной апертуры источника излучения, а также экспериментально определенный радиальный профиль интенсивности УФ-излучения представлены на рис. 2 (А и В соответственно).

Некоторая неоднородность распределения интенсивности УФ-излучения (рис. 2, А) обусловлена погрешностью расчета при ограниченной доступной вычислительной мощности.

На рис. 2, В точками показаны результаты измерения интенсивности УФ-излучения вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров в зависимости от расстояния от оптической оси, проходящей через центр апертуры источника света. Кривая представляет собой полиномиальную интерполяцию результатов измерений, дающую усредненный осесимметричный профиль распределения интенсивности. Данные приведены для полной мощности потока УФ-излучения через выходную апертуру 715 мВт, с которой и проводились представленные далее эксперименты (оптимизация геометрии полости и ис-

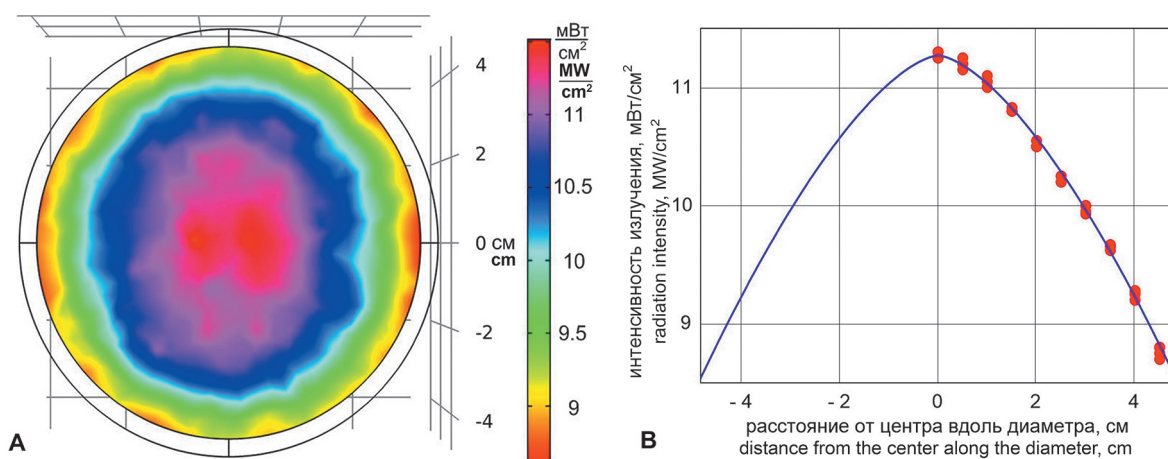


Рис. 2. Распределение интенсивности УФ-излучения РЛНД:
 А – результаты распределения интенсивности УФ-излучения, полученные путем математического моделирования методом лучевой оптики;
 В – результаты измерения интенсивности УФ-излучения вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров

Fig. 2. Intensity distribution of the UV radiation of the low-pressure mercury lamp:
 А – the results of the intensity distribution of the UV radiation obtained by mathematical modeling using the method of ray optics;
 В – the results of intensity measuring of the UV radiation along two mutually perpendicular diameters

пользуемых материалов позволила реализовать максимальную мощность выводимого через открытый торец излучения до 1 Вт). По результатам измерений можно сделать вывод, что интенсивность УФ-излучения в плоскости выходной апертуры полости изменяется не более чем на 5–6 % относительно среднего значения. Таким образом, распределение интенсивности УФ-излучения на выходе разработанного источника с хорошей точностью можно считать однородным.

На рис. 3 представлена зависимость интенсивности УФ-излучения на длине волны 254 нм на оптической оси, проходящей через центры источника излучения и облучаемых образцов, от расстояния *h* от выходной апертуры источника до плоскости расположения облучаемых образцов. На рис. 3 представлены результаты для расстояния *h* не более 30 см (А) и от 30 до 90 см (В) соответственно. Точки на графиках отражают измеренные значения, кривые – результат математического моделирования.

Точность измерений интенсивности УФ-излучения (5 %) обеспечивалась процедурой калибровки и проверки используемых приборов, а также результатами математического моделирования разработанного источника вирулицидного излучения, приводящими к зависимости интенсивности бактерицидного излучения от расстояния, совпадающей с результатами измерений (рис. 3), которые были использованы для определения доз УФ-излучения в экспериментах. Облучение образцов проводилось с расстояний, которые многократно превосходили их поперечные размеры, то есть интенсивность УФ-излучения на любом участке образца с высокой точностью совпадала с его интенсивностью на оси симметрии нашего цилиндрического излучателя.

Контаминации подвергали поверхности тест-объектов двух типов: пластиковые чашки Петри (одноразовые) и офисную бумагу (марка С, плотность 80 г/м²). Площадь контаминации составила: для пластика – 25 см², для бумаги – 4 см².

Объем вирусной суспензии, наносимой на поверхность тест-объекта, составил: для пластика – 0,10 мл, для бумаги – 0,05 мл. На пластиковой поверхности указанный объем равномерно распределяли стеклянным шпателем. На бумаге равномерность

нанесения достигалась при помощи автоматической пипетки NEO P100N.

Исходная биологическая активность вируса составила 5,3·10⁴ БОЕ/мл.

Уровень контаминации определяли во флаконах с монослоем суточного возраста клеток Vero C1008 методом негативных колоний под агаровым покрытием и выражали в бляшкообразующих единицах (БОЕ). Для проведения расчетов использовали метод последовательных десятикратных разведений полученных проб. Уровни инициальной и остаточной контаминации тест-объектов, выраженные в БОЕ/см², рассчитывали в соответствии с Руководством Р 4.2.3676-20 «Методы лабораторных исследований и испытаний дезинфекционных средств для оценки их эффективности и безопасности», утвержденным и введенным в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 12.12.2020.

Результаты и обсуждение

Результаты определения уровней контаминации коронавирусом SARS-CoV-2 тест-объектов до и после воздействия на них облучения, создаваемого УФ-фонарем с расстояния 25 и 70 см, представлены в табл. 1 и 2.

Анализ данных этих таблиц позволяет сделать вывод, что УФ-облучение с расстояния 25 см при экспозиции 60 с приводит к полной инактивации коронавируса на пластиковых и бумажных поверхностях с исходным уровнем контаминации порядка $n \cdot 10^4$ БОЕ/см².

При использовании УФ-фонаря на расстоянии 70 см от поверхности тест-объектов с экспозицией 90 с наблюдались остаточные уровни контаминации. Эти уровни составили: для пластиковой поверхности – 1,8 БОЕ/см², для бумажной – 2,5 БОЕ/см².

С использованием данных, представленных в табл. 1 и 2, рассчитана степень обеззараживания пластиковых и бумажных поверхностей с коронавирусом SARS-CoV-2 в зависимости от дозы (расстояние – время) облучения, создаваемой УФ-фонарем. Под степенью обеззараживания тест-объектов, контаминированных тест-вирусом, следует пони-

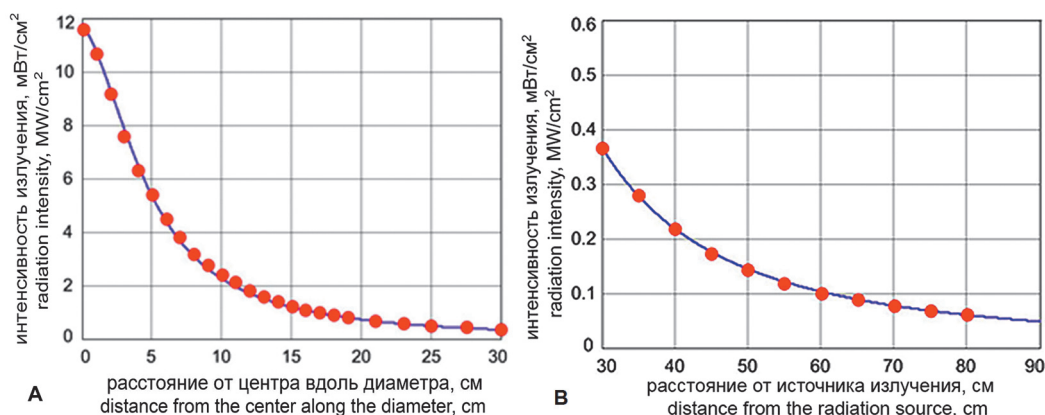


Рис. 3. Зависимость интенсивности УФ-излучения от расстояния от выходной апертуры источника до облучаемых образцов

Fig. 3. Dependence of the UV radiation intensity on the distance from the output aperture of the source to the irradiated samples

Таблица 1 / Table 1

Уровень контаминации различных поверхностей с коронавирусом SARS-CoV-2 до и после применения УФ-фонаря с расстояния 25 см
 The level of contamination of various surfaces with SARS-CoV-2 coronavirus before and after applying the UV lamp from a distance of 25 cm

Наименование поверхности (ее тип) Name of the surface (its type)	Среднее значение уровня исходной контаминации, БОЕ/см ² The average value of the initial contamination level, PFU/cm ²	Среднее значение уровня остаточной контаминации после облучения с экспозицией ..., БОЕ/см ² (n=3) The average value of the level of residual contamination after exposure to radiation for ..., PFU/cm ² (n=3)		
		15 с 15 s	30 с 30 s	60 с 60 s
Пластик (одноразовая чашка Петри из полистирола) Plastic (disposable polystyrene Petri dish)	6,8·10 ⁴	2,8	0,4	0
Бумага листовая (для офисной техники, А4, 80 г/м ²) Sheet paper (for office machinery, A4, 80 g/m ²)	2,6·10 ⁴	2,2·10 ¹	2,5	0

Таблица 2 / Table 2

Уровень контаминации коронавирусом SARS-CoV-2 различных поверхностей до и после применения УФ-фонаря с расстояния 70 см
 The level of contamination of various surfaces with SARS-CoV-2 coronavirus before and after applying the UV lamp from a distance of 70 cm

Наименование поверхности (ее тип) Name of the surface (its type)	Среднее значение уровня исходной контаминации, БОЕ/см ² The average value of the initial contamination level, PFU/cm ²	Среднее значение уровня остаточной контаминации после облучения с экспозицией ..., БОЕ/см ² (n=3) The average value of the level of residual contamination after exposure to radiation for ..., PFU/cm ² (n=3)		
		30 с 30 s	60 с 60 s	90 с 90 s
Пластик (одноразовая чашка Петри из полистирола) Plastic (disposable polystyrene Petri dish)	6,8·10 ⁴	3,0·10 ¹	2,6	1,8
Бумага листовая (для офисной техники, А4, 80 г/м ²) Sheet paper (for office machinery, A4, 80 g/m ²)	2,6·10 ⁴	6,4·10 ¹	1,7·10 ¹	2,5

мать антимикробную эффективность УФ-облучения в соответствии с требованиями Руководства Р 3.5.1904-04, утвержденного и введенного в действие Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 04.03.2004.

Результаты исследований свидетельствуют о высокой эффективности УФ-фонаря по обработке как гладкой (пластиковой), так и пористой (бумажной) поверхностей, контаминированных коронавирусом SARS-CoV-2. Для указанных поверхностей «бактерицидная» эффективность с расстояния 25 см и с экспозицией 60 с составила 100 %. При той же экспозиции, но с расстояния 70 см эффективность УФ-фонаря составила: для пластиковой поверхности – 99,996 %, для бумажной – 99,935 %.

Таким образом, использование компактных облучателей на базе РЛНД позволяет в короткие сроки обеспечить высокую степень дезинфекции пластиковой и бумажной поверхностей от коронавируса SARS-CoV-2 с эффективностью, близкой к 100 %.

Полученные результаты позволяют рекомендовать портативный УФ-облучатель с автономным питанием от компактного аккумулятора с продолжительностью работы 3–4 часа при производительности обеззараживания от 2 м²/мин для использования в практике профилактических мероприятий по борьбе с распространением заболевания, вызванного коронавирусом SARS-CoV-2, с целью дезинфекции:

пластиковых предметов перед утилизацией, бумажных носителей (медицинских карт, справок, журналов и др.) в случае необходимости их выноса из «закрытой» зоны.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают отсутствие конфликта финансовых/нефинансовых интересов, связанных с написанием статьи.

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии дополнительного финансирования при проведении данного исследования.

References / Список литературы

- van Doremalen N., Bushmaker T., Morris D.H., Holbrook M.G., Gamble A., Williamson B.N., Tamin A., Harcourt J.L., Thornburg N.J., Gerber S.I., Lloyd-Smith J.O., de Wit E., Munster V.J. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *N. Engl. J. Medicine.* 2020; 382(16):1564–7. DOI: 10.1056/NEJMc2004973.
- Chin A.W.H., Chu J.T.S., Perera M.R.A., Hui K.P.Y., Yen H.L., Chan M.C.W., Peiris M., Poon L.L.M. Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. *Lancet Microbe.* 2020; 1(1):e10. DOI: 10.1016/S2666-5247(20)30003-3.
- Seyer A., Sanlidag T. Solar ultraviolet radiation sensitivity of SARS-CoV-2. *Lancet Microbe.* 2020; 1(1):e8–e9. DOI: 10.1016/S2666-5247(20)30013-6.
- Bai Y., Yao L., Wei T., Tian F., Jin D.Y. Chen L., Wang M. Presumed asymptomatic carrier transmission of COVID-19. *JAMA.* 2020; 323(14):1406–7. DOI: 10.1001/jama.2020.2565.
- Cevik M., Tate M., Lloyd O., Maraolo A.E., Schafers J., Ho A. SARS-CoV-2, SARS-CoV, and MERS-CoV viral load dynamics, duration of viral shedding, and infectiousness: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Microbe.* 2021; 2(1):e13–e22. DOI: 10.1016/S2666-5247(20)30172-5.
- Gerlach M., Wolff S., Ludwig S., Schäfer W., Keiner B., Roth N.J., Widmer E. Rapid SARS-CoV-2 inactivation by common-

ly available chemicals on inanimate surfaces. *J. Hosp. Infect.* 2020; 106(3):633–4. DOI: 10.1016/j.jhin.2020.09.001.

7. Meyers C., Kass R., Goldenberg D., Milici J., Alam J., Robinson R. Ethanol and isopropanol inactivation of human coronavirus on hard surfaces. *J. Hosp. Infect.* 2021; 107:45–9. DOI: 10.1016/j.jhin.2020.09.026.

8. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2009. 503 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01999-9.

9. Reed N.G. The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public Health Rep.* 2010; 125(1):15–27. DOI: 10.1177/003335491012500105.

10. Hirano N., Hind S., Fujiwara K. Physico-chemical properties of mouse hepatitis virus (MHV-2) grown on DBT cell culture. *Microbiol. Immunol.* 1978; 22(7):377–90. DOI: 10.1111/j.1348-0421.1978.tb00384.x.

11. Saknimit M., Inatsuki I., Sugiyama Y., Yagami K. Virucidal efficacy of physico-chemical treatments against coronaviruses and parvoviruses of laboratory animals. *Jikken Dobutsu. Experimental Animals.* 1988; 37(3):341–5. DOI: 10.1538/expanim1978.37.3_341.

12. Walker C., Ko G. Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols. *Environ. Sci. Technol.* 2007; 41(15):5460–5. DOI: 10.1021/es070056u.

13. Storm N., McKay L.G.A., Downs S.N., Johnson R.I., Birru D., de Samber M., Willaert W., Gennini G., Griffiths A. Rapid and complete inactivation of SARS-CoV-2 by ultraviolet-C irradiation. *Sci. Rep.* 2020; 10(1):22421. DOI: 10.1038/s41598-020-79600-8.

14. Heilingloh C.S., Aufderhorst U.W., Schipper L., Dittmer U., Witzke O., Yang D., Zheng X., Sutter K., Trilling M., Alt M., Steinmann E., Krawczyk A. Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV irradiation. *Am. J. Infect. Control.* 2020; 48(10):1273–5. DOI: 10.1016/j.ajic.2020.07.031.

15. Ruotalo N., Businger R., Schindler M. Rapid, dose-dependent and efficient inactivation of surface dried SARS-CoV-2 by 254 nm UV-C irradiation. *Euro Surveill.* 2021; 26(42):2001718. DOI: 10.2807/1560-7917.ES.2021.26.42.2001718.

16. Inagaki H., Saito A., Sugiyama H., Okabayashi T., Fujimoto S. Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with deep-UV LED irradiation. *Emerg. Microbes Infect.* 2020; 9(1):1744–7. DOI: 10.1080/22221751.2020.1796529.

17. Kitagawa H., Nomura T., Nazmul T., Kawano R., Omori K., Shigemoto N., Sakaguchi T., Ohge H. Effect of intermittent irradiation and fluence-response of 222 nm ultraviolet light on SARS-CoV-2 contamination. *Photodiagnosis Photodyn. Ther.* 2021; 33:102184. DOI: 10.1016/j.pdpdt.2021.102184.

18. Buonanno M., Welch D., Shuryak I., Brenner D.J. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. *Sci. Rep.* 2020; 10(1):10285. DOI: 10.1038/s41598-020-67211-2.

Authors:

Masyakin D.N., Alferov A.E., Androshchuk I.A., Kirillov V.B., Kirillova S.L., Koval'chuk E.A., Trufanova V.V., Chepurenkov N.Ya., Borisevich S.V. 48th Central Research Institute. 11, Oktybrskaya St., Sergiev Posad-6, Moscow Region, 141306, Russian Federation. E-mail: 48cnii@mil.ru.

Kikot' S.G. Directorate of the Chief of Radiation, Chemical and Biological Protection Troops of the Armed Forces of the Russian Federation. 2/2, Frunzenskaya Embankment, Moscow, 119526, Russian Federation.

Kotov M.A., Solov'ev N.G., Shemyakin A.N., Yakimov M.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics. 101, bld. 1, Vernadskogo Avenue, Moscow, 119526, Russian Federation. E-mail: ipm@ipmnet.ru.

Lopota V.A. Russian State Scientific Centre for Robotics and Technical Cybernetics. 21, Tikhoretsky Avenue, Saint-Petersburg, 194064, Russian Federation. E-mail: rtc@rtc.ru.

Rudoy I.G., Soroka A.M. Innovative Scientific and Technological Company "ProTech". 7, bld. 2, Svobodny Avenue, Moscow, 111555, Russian Federation. E-mail: protek@protek.ru.

Об авторах:

Масякин Д.Н., Алферов А.Е., Андросчук И.А., Кириллов В.Б., Кириллова С.Л., Ковальчук Е.А., Труфанова В.В., Чепуренков Н.Я., Борисевич С.В. 48 Центральный научно-исследовательский институт. Российская Федерация, 141306, Московская обл., Сергиев Посад-6, ул. Октябрьская, 11. E-mail: 48cnii@mil.ru.

Кикоть С.Г. Управление начальника войск радиационной, химической и биологической защиты Вооруженных Сил Российской Федерации. Российская Федерация, 119160, Москва, Фрунзенская наб., 22/2.

Котов М.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского. Российская Федерация, 119526, Москва, пр-т Вернадского, 101, корп. 1. E-mail: ipm@ipmnet.ru.

Лопота В.А. Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики. Российская Федерация, 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр-т, 21. E-mail: rtc@rtc.ru.

Рудой И.Г., Сорока А.М. Инновационная научно-технологическая компания «ПроТек». Российская Федерация, 111555, Москва, Свободный пр-т, 7, корп. 2. E-mail: protek@protek.ru.