

УДК 577.344; 577.342; 577.34

# Спектры фотобиологической инактивации коронавируса SARS-CoV-2 солнечным излучением УФБ-диапазона (280–320 нм)

В.Е. Прокопьев<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 11.05.2021 г.

На основе результатов экспериментальных наземных наблюдений интенсивности и спектра солнечного УФБ-излучения в г. Томске (56°29' с.ш., 84°56,89' в.д.) с 26.03.2020 по 26.03.2021 г. и анализа работ по строению и химическому молекулярному составу коронавируса SARS-CoV-2 впервые определены первичные фотоакцепторы и спектры фотобиологической инактивации молекулярных структур коронавируса радиацией УФБ-диапазона.

*Ключевые слова:* COVID-19, SARS-CoV-2, геном, РНК, спектры фотобиологической инактивации, фотоакцепторные молекулы, активные центры, S-белки, гуанин, триптофан, гидроксильная молекула; COVID-19, SARS-CoV-2, spectra of photobiological action, photoacceptor molecules, active centers, RNA, S-protein, guanine, tryptophan, hydroxyl molecule.

## Введение

Вспышка вирусного заболевания COVID-19, вызванная коронавирусом (КВ) SARS-CoV-2 (Severe acute respiratory syndrome coronavirus), поставила перед врачами и мировым научным сообществом множество сложных вопросов, связанных с необходимостью объяснения причин возникновения, путей и условий распространения эпидемии, а также разработки и создания новых методов диагностики, лечения и прогноза заболевания.

Полный цикл существования вирусных образований можно разделить на две части: первая включает в себя проникновение, размножение и выделение вирусов животными или растительными клетками (жизненный цикл вируса в клетке), вторая – существование и распространение вируса во внешней среде. Первую часть жизненного цикла вируса изучает вирусология, поэтому в настоящей работе она не рассматривается. Анализируется вторая часть жизненного цикла вирусных частиц с точки зрения путей и условий переноса, а также механизмов выживания вирусов во внешней среде в зависимости от физических (метеорологических) параметров последней.

SARS-CoV-2, как и многие другие КВ, передается воздушно-капельным путем при контакте с заболевшими, как с теми, у которых есть симптомы болезни, так и с теми, у кого болезнь протекает бессимптомно [1].

\* Владимир Егорович Прокопьев (prokop@ogl.hcei.tsc.ru).

Возможен также другой способ передачи – путем контакта восприимчивого к инфекции человека с контаминированным предметом или поверхностью. Дезинфекция окружающей среды, в том числе с помощью бактерицидных ультрафиолетовых (УФ) ламп, имеет решающее значение для предотвращения распространения болезнетворных, передающихся воздушно-капельным путем.

Благодаря результатам многих натуральных и лабораторных исследований доказано, что в основе бактерицидного, цитотоксического и мутагенного эффектов УФ-излучения лежит поглощение УФ-квантов молекулами ДНК и РНК бактерий и вирусов [2]. По фотобиологическому действию УФ-излучение условно разделяют на три диапазона: УФС (100–280 нм), УФБ (280–320 нм) и УФА (320–400 нм). Для дезинфекции помещений используют УФС ртутные лампы с максимумом излучения на длине волны  $\lambda = 253,7$  нм. Наибольшая бактерицидная и цитотоксическая эффективность УФС приходится на  $\lambda = 250–260$  нм и совпадает с максимумом поглощения излучения нуклеиновыми кислотами.

В [3] проведен анализ результатов экспериментов по облучению различных видов КВ излучением с  $\lambda = 254$  нм для определения дозы УФ-излучения, необходимой для их инактивации. Коронавирусы имели схожую физико-химическую структуру, одинаковую длину одиночной цепи РНК и величину генома. Китайские исследователи расшифровали и охарактеризовали геном нового коронавируса и обнаружили его сильное сходство с рядом уже

изученных КВ [4, 5].) Были определены спектры фотобиологического действия и дозы УФС-излучения, необходимые для уменьшения количества жизнеспособных вирусов на 90% (в  $\sim e^{-2}$  раз). По оценке авторов [3], верхний предел соответствующей дозы составляет  $\sim 10,6$  мДж/см<sup>2</sup>, в то время как наиболее вероятное предсказанное среднее значение составляло всего 3,7 мДж/см<sup>2</sup>.

Почти одновременно с [3] появилась публикация, в которой экспериментально показана возможность инактивации SARS-CoV-2 УФС-излучением [6]. Вирус оказался очень чувствительным к УФ-излучению. В работе вирусный материал с высоким инфекционным титром был полностью инактивирован за несколько минут УФ-облучения. Доза УФС, необходимая для полной инактивации, составила 1,048 мДж/см<sup>2</sup>, что близко к значению, предсказанному в [3]. Воздействие же УФА-излучения ( $\lambda = 365$  нм) оказывало слабый инактивационный эффект.

Таким образом, традиционный метод дезинфекции – УФС-облучение [7] – приводит к инактивации КВ, в частности SARS-CoV-2.

Однако в естественных условиях солнечное излучение УФС-диапазона полностью поглощается молекулами озона, кислорода и окислами атмосферных газов уже в верхних слоях атмосферы. До поверхности Земли полностью доходит только солнечное излучение УФА-диапазона (320–400 нм), а также ослабленное и трансформированное солнечное излучение УФБ-диапазона (280–320 нм). Тем не менее присутствие солнечного УФБ-излучения на поверхности Земли и высокая вероятность его фотобиологического воздействия на бактерии и вирусы представляют значительный интерес.

Принципиальной работой в этом направлении является сообщение [8], где были определены «летальные» дозы радиации, снижающие жизнеспособность вирусов на 37% (в 2,71 раза) в зависимости от параметров излучения и размера генома вируса. Полученные результаты и выводы [8] были положены в основу расчета летальных доз солнечной радиации, необходимых для инактивации SARS-CoV-2, в различных регионах Земли в период с января по май 2020 г. [9].

В ряде лабораторных экспериментов определена выживаемость SARS-CoV-2 в водно-капельных аэрозолях слюны и на различных поверхностях при их освещении источником, моделирующим солнечное УФБ-излучение (ксеноновая лампа) [10–12].

Результаты работы [8] относительно спектра фотобиологического действия солнечного УФБ-излучения (280–320 нм) на вирусные частицы и экспериментальные данные по летальным дозам УФС/Б-радиации [3, 10–12] были использованы в [13] для расчета спектров фотобиологического действия и летальных доз радиации в различных регионах Земли.

На основе последних работ были созданы имитационные модели и программы расчета, позво-

ляющие оценивать время распада (инактивации) SARS-CoV-2 на поверхностях и в аэрозолях, которое в основном зависит только от УФ-индекса (УФИ) и – незначительно – от температуры и относительной влажности окружающей среды [14]. Найти вышеуказанные параметры окружающей среды для конкретного местоположения можно, обратившись к общим погодным ресурсам в интернете.

В настоящей работе на основе результатов экспериментальных наземных наблюдений интенсивности и спектра солнечного излучения в УФБ-диапазоне в г. Томске (56°29' с.ш., 84°56,89' в.д.) с 26 марта 2020 по 26 марта 2021 г. и анализа научных работ по строению и химическому молекулярному составу SARS-CoV-2 проведено исследование первичных фотоакцепторов (хромофоров) и спектров фотобиологической инактивации молекулярных структур КВ для присутствующего на поверхности Земли УФБ-излучения.

## Методики и техника эксперимента

Для измерения характеристик солнечного излучения на Земле использовалось два изготовленных по нашему заказу спектрометра фирмы Ocean Optics HR4000 с высоким спектральным разрешением и областью чувствительности 200–300 и 250–350 нм. Спектральное разрешение  $\sim 0,1 \pm 0,05$  нм достигалось в результате использования линейной ПЗС-матрицы Toshiba TCD1304AP, состоящей из 3648 элементов (пикселей), дифракционной решетки 2400 шт./мм и входной щели размером 25 мкм. Настройка оптической оси прибора на центральную область солнечного диска осуществлялась вручную с помощью направляющих. Для измерения спектрального разрешения приборов и калибровки по длинам волн использовалось излучение ртутной лампы низкого давления ДРГС-12. Чтобы избежать вредных фоновых засветок светочувствительных элементов устройства, сопутствующих исследуемому участку солнечного излучения, на входе, как правило, устанавливался широкополосный светофильтр УФС-1 с полосой пропускания 230–400 нм из стандартного набора светофильтров.

Технические характеристики используемых спектрометров и программное обеспечение Spectra-Suite позволяют обрабатывать результаты в режиме реального времени и накапливать сигнал (экспозиция) в диапазоне от 10 мс до 65 с. Исходные численные значения спектров солнечного излучения вне атмосферы, спектров поглощения атмосферных газов, жидкой воды и биологических молекул в водных растворах были взяты из хорошо известных баз и банков данных [15–17]. Для ежедневного определения и сравнения метеорологических параметров в различных регионах (температуры, давления, озона, влажности, УФИ, аэрозоля, NO<sub>2</sub> и т.д.) использовались геометеорологические программы Windy.com и Gismeteo.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

### *Первичные фотоакцепторы и молекулярные структуры КВ в биоаэрозолях слюны*

Спектры поглощения слюны в норме и при патологиях полости рта хорошо изучены методами молекулярной абсорбционной спектроскопии и флуоресценции [18]. Химический состав водно-капельных аэрозольных частиц, моделирующих слюну человека, содержащую вирусные образования, исследован и описан в упомянутых выше экспериментальных работах [10–12]. На 98,5% слюна человека состоит из воды и растворенных в ней неорганических солей и органических молекул (муцин, лизоцим, ферменты амилаза, мальтоза, всего более 100 ферментов всех классов). В случае COVID-19 к этим молекулам добавляется SARS-CoV-2.

В УФБ-области спектра биологические жидкости и ткани, в том числе кровь, как правило, имеют «минимальное» поглощение на  $\lambda = 310 \pm 10$  нм, которое обусловлено с коротковолновой стороны ( $\lambda \leq 290$  нм) поглощением молекул белков, нуклеиновых кислот и продуктов их распада, а с длинноволновой стороны ( $\lambda \geq 320$  нм) — поглощением молекул порфиринов, каротинов и т.д. Эти органические молекулы конкурируют за УФБ-фотоны с молекулами SARS-CoV-2, которые поглощают в той же области, что уменьшает эффективность фотобиологической инактивации вируса. Основная составляющая слюны — вода — очень слабо поглощает УФБ-излучение, поэтому спектры фотобиологического действия фотоакцепторных биологических молекул в указанной области будут близки к спектру поглощения этих молекул в водных растворах [17]. Вывод тем более справедлив для водно-капельных биоаэрозолей слюны больных COVID-19, средние размеры которых не превышают 100 мкм (0,1 мм) и содержат КВ, инактивируемые УФБ-радиацией.

Рассмотрим подробнее молекулярный состав SARS-CoV-2. Его геном состоит из одноцепочечной РНК; он окружен белково-липидной мембраной, важнейшей частью которой является S'-белок, отвечающий за проникновение вируса в клетки хозяина.

В цепи РНК кроме четырех азотистых оснований содержится рибоза, у которой есть дополнительная, по сравнению с дезоксирибозой в молекуле ДНК, гидроксильная хромофорная группа —ОН в положении 2' углерода. Эта группа увеличивает вероятность гидролиза молекул и определяет физико-химические, в том числе оптико-спектроскопические, свойства РНК на длинах волн вблизи основной полосы поглощения  $A^{2\Sigma^+}(\nu' = 0) \leftarrow X^2\Pi(\nu'' = 0)$  ОН, которая при комнатных температурах наблюдается в виде относительно узкой полосы в области 306,4 ÷ 315 нм с максимумом на длине волны вблизи 309 нм [19]. Это приводит к длинноволновому сдвигу и росту поглощения в области

УФБ, а значит и к увеличению скорости инактивации цепи РНК по сравнению с ДНК.

Кроме стандартного фотобиологического механизма инактивации генома (РНК), в SARS-CoV-2 могут существовать и другие молекулярные структуры, способные изменять свои физико-химические свойства под действием солнечного УФБ-излучения. Действительно, физико-химическое строение и молекулярный состав SARS-CoV-2, а также его функциональные свойства связаны в первую очередь с белковыми отростками-шипами (англ. spike), активные центры которых похожи на аналогичные центры КВ атипичной пневмонии SARS-CoV и содержат относительно большое количество ароматических аминокислот, таких как фенилаланин, триптофан и тирозин [20]. Процесс поглощения фотонов этими фотоакцепторами активных центров S-белка может привести к перестройке молекулярной структуры активного центра и инактивировать КВ. Под инактивацией мы будем подразумевать нарушение стандартных путей связывания ароматических аминокислотных молекул активного центра S-белка с молекулами рецептора клетки хозяина.

Последние две из вышеперечисленных ароматических аминокислот имеют длинноволновое плечо поглощения, расположенное в УФБ-диапазоне спектра, обусловленное поглощением ароматического (фенольного) кольца. Причем молекула тирозина содержит дополнительную хромофорную группу —ОН, которая и приводит к длинноволновому сдвигу его полосы поглощения по сравнению с фенилаланином и триптофаном. Именно присутствием тирозина во множестве биологических тканей обусловлены хорошо известные фотобиологические явления, в том числе ответственные за эритемную реакцию и пигментацию кожи.

Спектры поглощения этих фотоакцепторов, необходимые для расчета спектров фотобиологического действия в УФБ-диапазоне, в настоящее время хорошо известны [15–17]. Для определения (расчета) спектров фотобиологического действия, кроме спектров поглощения фотобиологических мишеней, необходимо знать спектры солнечного излучения (СИ) на поверхности Земли. Последние можно получить различными способами, например из спутниковых измерений, модельных расчетов и прямых измерений с помощью спектральных приборов наземной сети. При этом наземные измерения наиболее точны, особенно для УФБ-диапазона [21].

Если исходить из молекулярного состава генома и мембраны SARS-CoV-2, особенно S-белка мембраны, наличие в активном центре этого белка хромофоров, в том числе триптофана и тирозина, способных поглощать в УФБ-области спектра, показывает их чувствительность к солнечному излучению, а значит, возможность инактивации КВ.

### *Сезонные спектры солнечного излучения на поверхности Земли (г. Томск)*

Уровень УФ-излучения на поверхности Земли определяется целым рядом хорошо изученных в настоящее время факторов: время года, суток, метео-

рологические параметры, географическое место наблюдения [20, 21].

На рис. 1 представлены спектры полуденного солнечного излучения, измеренные нами в разные сезоны года в характерные дни. Эти дни, как правило, отражают репрезентативную выборку спектров, характеризующих различные сезоны в регионе наблюдений.

Из спектральных данных на рис. 1 следует, что коротковолновая граница солнечного УФ-излучения, измеренная в день зимнего солнцестояния 21 декабря 2020 г. (самый короткий световой день и минимальный угол Солнца над горизонтом), приходится на ~310 нм. При средних условиях прозрачности и среднем содержании озона эта граница совпадает с коротковолновой границей прямого солнечного излучения на Земле, измеренной в работах [20, 21] при высоте Солнца 15°. Интенсивность излучения на длинноволновой границе УФБ-диапазона ( $\lambda = 320$  нм) уменьшается при этом на два порядка по сравнению с вертикально падающим на поверхность Земли солнечным излучением [20, 21]. В день летнего солнцестояния 21 июня 2020 г. (ясный день) эта граница сдвигается до 295 нм, а интенсивность излучения вблизи длинноволновой границы ( $\lambda = 320$  нм) растет на 1 или 2 порядка по сравнению с днем зимнего солнцестояния. Как видно из рис. 1, в дни летнего и зимнего солнцестояния наблюдается максимальная разница как в интенсивности излучения прямого солнечного УФБ-излучения, так и в значениях коротковолновой границы (310 и 295 нм). Еще одна закономерность состоит в том, что для средних и малых

высот Солнца рассеянная радиация вносит в суммарную (глобальную) радиацию значительно больший вклад, чем прямая, особенно это справедливо для солнечного УФБ-излучения.

Из данных на рис. 1 следует, что коротковолновые границы спектров полуденного солнечного излучения в дни весеннего и осеннего равноденствия существенно различаются и составляют 300 и ~292 нм соответственно. Последнее значение оказалось даже меньше, чем для дня летнего солнцестояния. Учитывая, что высота Солнца над горизонтом в эти дни одинаковая, существенная разница значений коротковолновых границ этих сезонов и интенсивность излучения в УФ-области спектра для г. Томска можно объяснить разницей общего содержания озона в летнее-осенний (общее содержание минимально) и зимнее-весенний (максимально) периоды [21, 22].

Исходя из полученных данных можно качественно оценить УФИ для разных сезонов 2020–2021 гг. Отметим, что УФИ влияет на степень эритемной реакции кожи человека (покраснения, ожоги и пигментация) и сообщается в прогнозе погоды для Западной Сибири, в том числе для Томска. Для холодного времени года УФИ минимален, для поздней осени (ноябрь) и зимы (декабрь, январь, февраль) обычно равен нулю. В это время года в Северном полушарии, как правило, возникают и распространяются эпидемиологические заболевания. Так, первый случай заболевания COVID-19 был официально зарегистрирован в Китае, г. Ухань (30035'9" с.ш.) в декабре 2019 г.; пик заболеваемости COVID-19 в России и Томске пришелся на 21–25 декабря 2020 г.

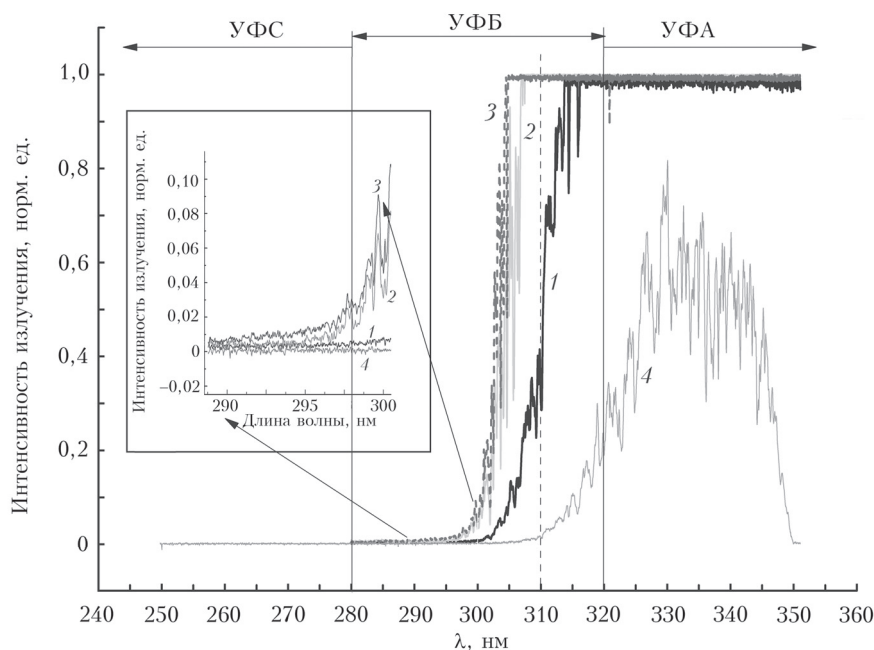


Рис. 1. Спектры солнечного излучения: весной (20.03.2021 г. — весеннее равноденствие) (кривая 1); летом (21.06.2020 г. — летнее солнцестояние) (кривая 2); осенью (22.09.2020 г. — осеннее равноденствие) (кривая 3); зимой (21.12.2020 г. — зимнее солнцестояние) (кривая 4); на вставке показана коротковолновая часть спектра в области 290–300 нм

Как следует из данных в Gismeteo, УФИ был максимален (~4÷8) летом и ранней осенью (сентябрь) 2020 г. Поэтому скорость распространения вируса воздушно-капельным путем была ограничена из-за высокой степени дезинфекции окружающей среды солнечным УФБ-излучением.

### **Идентификация спектра солнечного излучения на поверхности Земли (г. Томск)**

В отличие от практически постоянного спектра и интенсивности солнечного излучения вне атмосферы, которое исследовано с большим спектральным разрешением и в широком спектральном диапазоне, наземные спектры солнечного излучения в УФБ-области изучены недостаточно полно, особенно в высоких широтах, в силу малых интенсивностей, изменчивости и зависимости от метеопараметров, что затрудняет интерпретацию и идентификацию УФБ-спектра на поверхности Земли (рис. 2).

Для идентификации спектров солнечного УФБ-излучения на поверхности Земли в нашей работе были измерены спектры солнечного излучения в г. Томске (рис. 2, кривая 2) и проведена их «привязка» к стандартным спектрам солнечного излучения вне атмосферы (рис. 2, кривая 1), полученным в работе [23] с высоким спектральным разрешением 0,0028 нм, а также к спектрам излучения дуговой плазмы сухих образцов цельной крови (рис. 2, кривая 3). Спектры 2 и 3 были записаны в настоящей работе на спектрометре HR4000 с разрешением 0,1 нм в диапазоне 250–350 нм. Высокое спектральное разрешение прибора позволило провести идентификацию спектров СИ на поверхности Земли в области  $302,06 \pm 290$  нм с точ-

ностью привязки максимумов и минимумов спектров не хуже чем  $\pm 0,03$  нм. Анализ полученного спектра излучения в этом диапазоне показал, что для  $\lambda = 294,8$  нм он полностью идентичен спектру внеатмосферного солнечного излучения, а для  $\lambda = 294,8–289,5$  нм трансформирован в результате поглощения молекулами озона, кислорода, примесными молекулами и частицами аэрозоля, в том числе биологического происхождения.

В настоящей работе были также измерены спектры прямого и рассеянного солнечного излучения в осенне-зимнее время, вплоть до 29 декабря 2020 г. Суммарные результаты этих измерений в пасмурные дни, общее количество которых превышает 90% времени исследований, сводятся к смещению коротковолновой границы солнечного излучения до 310–320 нм в конце декабря. Это вызвано малыми углами Солнца, сильным обратным рассеянием и поглощением света облаками в УФБ. Однако при измерениях в ясные дни, которые пришлось на 26–29 ноября 2020 г., ситуация изменилась кардинально: коротковолновая граница прямого СИ в полуденное время была равна 310 нм, а при нахождении Солнца в зените и зенитных углах меньше  $45^\circ$  эта граница благодаря эффекту Рэля достигла 296 нм, что близко к предельным летним значениям ~292 нм. Значение границы увеличивалось с ростом зенитного угла. Хотя интенсивности рассеянного полуденного солнечного излучения были на порядки меньше летних значений, но интегральное по небосводу и времени коротковолновое солнечное излучение в осенне-зимне-весенний период даже на широте г. Томска ( $56^\circ$  с.ш.) в ясные дни соответствует УФИ  $\approx 3–4$ , что и обеспечивает инактивацию КВ даже в зимнее время.

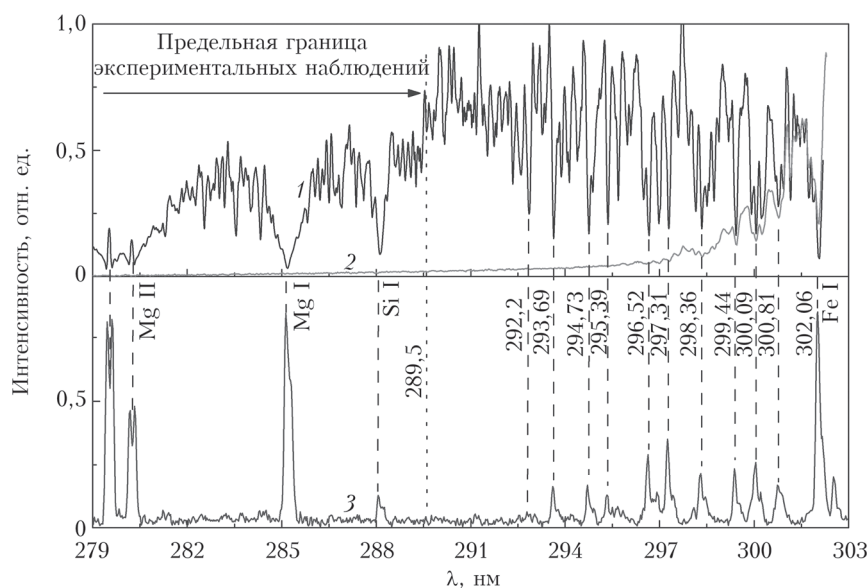


Рис. 2. Спектры солнечного излучения вне атмосферы с большим спектральным разрешением, согласно данным [23], (кривая 1) и на поверхности Земли (г. Томск) 30.08.2020 г. (кривая 2); спектр излучения сухого образца цельной крови в газоразрядной плазме угольной дуги (кривая 3)

Ясно, что наряду с интенсивным солнечным УФВ-излучением причиной инактивации КВ может быть и критическое понижение температуры окружающей среды до  $-25$ – $-30$  °С [2, 3].

### Спектры фотобиологического действия

Таким образом, на основе экспериментально измеренных спектров СИ на поверхности Земли в течение года (г. Томск, с 26.03.2020 по 26.03.2021 г.), а также на основе определения первичных фотоакцепторных молекул SARS-CoV-2 [4, 5, 20] и их спектров поглощения можно рассчитать спектры фотобиологической инактивации этого коронавируса.

На рис. 3 приведены рассчитанные спектры фотобиологической инактивации SARS-CoV-2 солнечным УФВ-излучением с учетом (1) и без учета (2) вклада гидроксильного хромофора ОН в спектр поглощения РНК, а также спектр фотобиологической инактивации S-белка (3), обусловленной поглощением молекулой триптофана.

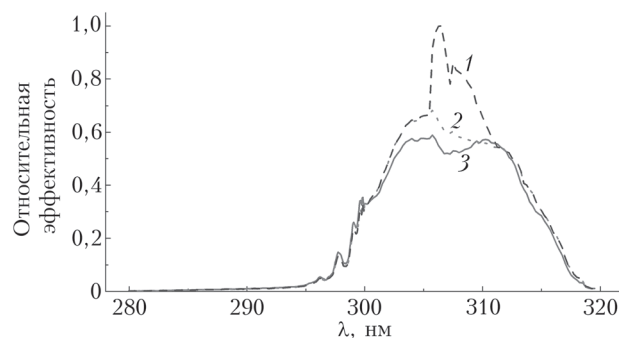


Рис. 3. Спектры фотобиологической инактивации коронавируса SARS-CoV-2: 1 – с учетом молекулы ОН глюкозы в положении 2' углерода (РНК); 2 – азотистого основания гуанина (РНК); 3 – триптофана (spike S-белка); 17.12.2020 г., 12:58 по местному времени

Расчет спектров фотобиологического действия проводился по формуле  $A(\lambda) = I(\lambda)K(\lambda)$ , где  $I(\lambda)$  – нормированная на  $\lambda = 320$  нм интенсивность солнечного излучения в определенный момент времени;  $K(\lambda)$  – коэффициент поглощения определенного фотоакцептора – активного центра, вызывающего соответствующее фотобиологическое действие, – нормированный на значение коэффициента поглощения на  $\lambda = 300$  нм.

При этом предполагалась независимость поглощения фотонов отдельными фотоакцепторами в молекулярных наноструктурах, размеры которых равны или меньше длины волны падающего света (активный центр S-белка, РНК). При расчете спектра фотобиологической инактивации РНК в случае учета молекулы ОН полагалось, что сечение поглощения гидроксильной молекулы в максимуме полосы ( $\sim 306,4$  нм) равняется сечению поглощения гуанина в этой же области длин волн. Однако для правильной численной оценки спектров фотобиологической инактивации РНК необходимы результаты экспериментальных измерений сечения поглощения функциональной группы ОН в различных

сложных биологических молекулах и структурах с большим спектральным разрешением ( $\leq 1$  нм).

Нормировка  $K(\lambda)$  предполагает, что каждый поглощенный фотон на  $\lambda < 300$  нм со 100%-й квантовой эффективностью вызывает упомянутый фотобиологический эффект. С точки зрения оценки значимости солнечного УФВ для фотобиологических явлений важна летальная доза и время деструктивных процессов, например инактивации (бактерицидное действие) вирусов или микробов или положительное конструктивное действие или эффект, например, синтез витамина D. Иногда для оценки значимости солнечного излучения наиболее важна дневная доза, которая рассчитывается интегрированием по всему периоду естественного освещения, как в случае фотосинтеза.

Из численных оценок спектров фотобиологического действия следует, что максимальная эффективность инактивации достигается на  $\lambda = 300$ – $315$  нм, что совпадает с максимальной интенсивностью солнечного УФВ-излучения в ясные дни. Следовательно, для профилактики и дезинфекции воздуха в помещениях, а также различных поверхностей могут оказаться эффективными и безопасными газоразрядные кварцевые лампы с парами воды, интенсивно излучающими на  $\lambda = 306,4$ – $320$  нм, и полупроводниковые светодиоды, излучающие в этом же диапазоне.

### Заключение

Проведены наземные экспериментальные измерения спектра прямого солнечного УФВ-излучения (280–320 нм) в г. Томске ( $56^{\circ}29'$  с.ш.,  $84^{\circ}56'$  в.д.) с 26 марта 2020 по 26 марта 2021 г. с высоким спектральным разрешением ( $\sim 0,1 \pm 0,05$  нм). Обнаружено, что в конце сентября и в зимнее время коротковолновая граница прямого солнечного излучения как в пасмурные, так и в ясные дни смещается до 310 нм, в то время как в ясные дни в рассеянном и глобальном излучении неба эта граница может достигать 296 нм за счет рэлеевского рассеяния прямого солнечного излучения в верхних слоях атмосферы.

На основе экспериментальных исследований спектральных характеристик СИ и литературного анализа химического молекулярного состава коронавируса определены первичные фотоакцепторы и мишени КВ:

- гуанин – азотистое основание цепи РНК коронавируса SARS-CoV-2;
- молекулы гидроксила –ОН глюкозы в положении углерода 2' в молекуле РНК;
- триптофан – в активном центре S-белка (spike glycoprotein – S) коронавируса.

Экспериментальные данные по спектру солнечного УФВ-излучения в течение весенне-летне-осеннего периода в Томске и спектрам поглощения первичных фотоакцепторов КВ позволили рассчитать спектр фотобиологической инактивации SARS-CoV-2 в аэрозолях слюны.

Из проанализированных научных работ и результатов настоящего исследования следует, что скорость роста числа заболевших COVID-19 в значительной степени зависит от обеззараживающего среду переноса КВ действия ультрафиолетового солнечного излучения (УФБ, УФА) в регионе. Интенсивность и спектр УФ-радиации в большой степени определяются геофизическими и метеорологическими параметрами региона, которые, в свою очередь, зависят от времени года и широты местности.

Автор благодарит В.В. Удута (НИИФ СО РАН, Томск), Н.Е. Зуеву и В.В. Зуева (ИМКЭС СО РАН, Томск) за доброжелательную критику и обсуждение результатов работы.

- Xu R., Cui B., Duan X., Zhang P., Zhou X., Yuan Q. Saliva: Potential diagnostic value and transmission of 2019-nCoV // *Int. J. Oral. Sci.* 2020. V. 12, N 11. P. 1–6.
- Diffey B.L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems // *Phys. Med. Biol.* 1991. 36. P. 299.
- Hessling M., Hones K., Vatter P., Haag R., Sieber N. Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation – review and analysis of coronavirus photoinactivation studies // *GMS Hyg. Infect. Control.* 2020. V. 15. P. 1–8.
- Lu R., Zhao X., Li Ju., Niu P., Yang B., Wu H., Wang W., Song H., Huang B., Zhu N., Bi Yu., Ma X., Zhan F., Wang L., Hu T., Zhou H., Hu Z., Zhou W., Zhao L., Chen Ji., Meng Ya., Wang Ji., Lin Ya., Yuan Ji., Xie Z., Ma Ji., Liu W.J., Wang D., Wenbo Xu W., Holmes E.C., Gao G.F., Wu G., Chen W., Shi W., Tan W. Genomic characterisation and epidemiology of 2019 novel coronavirus: implications for virus origins and receptor binding // *Lancet.* 2020. V. 395, N 10224. P. 565–574.
- Wu F., Zhao S., Yu B., ChenYan-Mei, Wang W., Hu Yi, Song Zhi-Gang, Tao Zhao-Wu, Tian Jun-Hua, Pei Yuan-Yuan, Yuan Ming-Li, Zhang Yu-Ling, Dai Fa-Hui, Liu Yi, Wang Qi-Min, Zheng Jiao-Jiao, Xu L., Holmes Ed.C., Zhang Yong-Zhen. Complete genome characterisation of a novel coronavirus associated with severe human respiratory disease in Wuhan, China. Preprint // *bioRxiv.* 2020. DOI: 10.1101/2020.01.24.919183.
- Heilingloh C.S., Aufderhorst U.W., Schipper L.S., 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. V. 48. P. 1273–1275.
- Соснин Э.А., Ерофеев М.В., Авдеев С.М., Панченко А.Н., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шутц Д.В. Ультрафиолетовая лампа барьерного разряда на молекулах ОН // *Квант. электрон.* 2006. Т. 36, № 10. С. 981–983.
- Lytle C.D., Sagripanti J.-L. Predicted inactivation of viruses of relevance to biodefense by solar radiation // *J. Virol.* 2005. V. 79, N 22. P. 14244–14252.
- Nicastro F., Siron G., Antonello E., Bianco A., Biasin M., Brucato J.R., Ermolli I., Pareschi G., Salvati M., Tozzi P., Trabattoni D., Clerici M. Modulation of COVID-19 epidemiology by UV-B and -A photons from the Sun. Preprint // *MedRxiv* 2020. DOI: 10.1101/2020.06.03.20121392.
- Schuit M., Gardner S., Wood S., Bower K., Williams G., Freeburger D., Dabisch P. The influence of simulated sunlight on the inactivation of influenza virus in aerosols // *J. Infect. Dis.* 2019. V. 221. P. 372–378.
- Schuit M., Ratnesar-Shumate S., Jason Yolitz J., Williams G., Weaver W., Green B., Miller D., Krause M., Beck K., Wood S., Holland B., Bohannon Jo., Freeburger D., Hooper I., Biryukov J., Altamura L.A., Wahl V., Hevey M., Dabisch P. Airborne SARS-CoV-2 Is rapidly inactivated by simulated sunlight // *J. Infect. Dis.* 2020. V. 222. P. 564–571.
- Ratnesar-Shumate S., Williams G., Brian Green B., Krause M., Holland B., Wood St., Bohannon Jo., Boydston Je., Freeburger D., Hooper I., Beck K., Yeager Jo., Altamura Louis A., Biryukov Je., Yolitz Ja., Schuit M., Wahl V., Hevey M., Dabisch P. Simulated sunlight rapidly inactivates SARS-CoV-2 on surfaces // *J. Infect. Dis.* 2020. V. 222. P. 214–222.
- Herman J., Biegel B., Huang L. Inactivation times from 290 to 315 nm UVB in sunlight for SARS coronaviruses CoV and CoV-2 using OMI satellite data for the sunlit Earth // *Air Qual., Atmos. Health.* 2020. DOI: 10.1007/s11869-020-00927-2.
- Estimated Decay of SARS-CoV-2 (virus that causes COVID-19) [Electronic resource]. URL: <https://dhs.gov/science-and-technology/sars-calculator> (last access: 11.04.2021).
- Gueymard C.A. Reference solar spectra: Their evolution, standardization issues, and comparison to recent measurements // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 323–340.
- Keller-Rudek H., Moortgat G.K., Sander R. The MPI-Mainz UV/VIS spectral atlas of gaseous molecules of atmospheric interest // *Earth Syst. Sci. Data.* 2013. V. 5, N 2. P. 365–373.
- Jacques S., Prahl S. Optical absorption of water compendium [Electronic resource]. URL: <https://omlc.org/spectra/water/abs/index.html> (last access: 9.09.2020).
- Yazid F., Zain M.N., Yusof Z.M., Ghazali F.S., Zulkifli S.A., Nadri N.M., Ariffin S.H.Z., Wahab R.M.A., Caries detection analysis in human saliva alpha amylase // *AIP Conf. Proc.* 2020. V. 2203. P. 1–7. DOI: 10.1063/1.5142106.
- Хьюбер К.-П., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул // под ред. Н.Н. Соболева. М.: Мир, 1984. 366 с.
- Tortoric M.A., Walls A.C., Lang Y., Wang Chu., Li Z., Koerhuis D., Boons G.-J., Bosch B.-J., Rey F.A., Groot R.J., Veesler D. Structural basis for human coronavirus attachment to sialic acid receptors // *Nat. Struct. Mol. Biol.* 2019. V. 26. P. 481–489.
- Биоиндикация стратосферного озона / под общей ред. В.В. Зуева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 228 с.
- Белан Б.Д. Озон в тропосфере / под ред. В.А. Погодаева. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
- Kohl J.L., Parkinson W.H., Kurucs R.L. Center and Limb Solar Spectrum in High Spectral Resolution: 225.2 nm to 319.6 nm. Cambridge: Harvard-Smithsonian Centre for Astrophysics, 1978. 365 p.

**V.E. Prokopenko. Spectra of photobiological inactivation of SARS-CoV-2 by solar UVB radiation (280–320 nm).**

In this work, based on experimental ground-based observations of the intensity and spectrum of solar radiation in the UVB range in the city of Tomsk (56°29' N, 84°56.89' E) from 26.03.2020 to 26.03.2021 and analysis of works on the structure and chemical molecular composition of SARS-CoV-2, primary photoacceptors and spectra of photobiological inactivation of the SARS-CoV-2 molecular structures (genome and S-thorn) by UVB radiation were determined for the first time.