
Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-71-82

ИСТОЧНИКИ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИИ СТАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

А.Б. Лаптев¹, М.Р. Павлов¹, Т.О. Зеленева¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведен пошаговый анализ спектра ультрафиолетового диапазона. Показано, что излучение диапазонов УФ-В и УФ-С присутствует на поверхности Земли в малых дозах. Излучение диапазона УФ-А достигает поверхности Земли в значительных дозах, что приводит к фотолизу и разрушению гетероорганических полимеров. Для проведения исследований методом имитации светового старения необходимо использовать наборы светодиодных источников излучения, в полной мере соответствующего по спектральному составу и мощности солнечному свету на поверхности Земли, в том числе излучения диапазона УФ-В (от 290 нм).

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, старение полимеров, частота ультрафиолетового излучения, источник ультрафиолета, фотолиз

Для цитирования: Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Зеленева Т.О. Источники светового излучения для имитации старения полимерных материалов под воздействием солнечной радиации // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-71-82.

Scientific article

LIGHT SOURCES FOR SIMULATING THE AGING OF POLYMER MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF SOLAR RADIATION

A.B. Laptev¹, M.R. Pavlov¹, T.O. Zeleneva¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. A step-by-step analysis of the ultraviolet spectrum was carried out. It is shown that UV-B and UV-C light are present on the Earth's surface in small doses. UV-A light on the Earth's surface has significant doses leading to photolysis and destruction of heteroorganic polymers. In order to conduct research by simulating light aging, it is necessary to simulate solar radiation in the range from 290 nm (UV-B) with a set of LED radiation sources that fully correspond to the spectral composition and power of Sunlight on the Earth's surface.

Keywords: ultraviolet radiation, polymer aging, ultraviolet frequency, source of ultraviolet, photolysis

For citation: Laptev A.B., Pavlov M.R., Zeleneva T.O. Light sources for simulating the aging of polymer materials under the influence of solar radiation. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-71-82.

Введение

Одной из наиболее важных характеристик полимерных, как конструкционных, так и функциональных, материалов является сохраняемость свойств в процессе естественного старения под действием факторов окружающей среды [1]. Имитация температуры и влажности в лабораторных условиях не представляет особой сложности, однако при имитации солнечного излучения возникает много вопросов и разночтений – многие государственные стандарты рекомендуют использовать различные искусственные источники излучения, создающие свет с разным спектральным распределением [2]. Цель данной статьи – определение условий лабораторных экспериментов по имитации солнечного излучения и воздействия его на полимерные материалы в условиях, соответствующих естественным. Наиболее важным условием является создание спектра искусственного освещения, соответствующего солнечному не только по мощности, но и по длинам волн [3–5].

В работе [6] представлены особенности солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения, измеренного на Антарктическом плато на француско-итальянской станции «Конкордия» весной 2008 и 2009 гг. Изучено влияние значительных весенних колебаний озонового столба на долю излучения диапазона УФ-В (~290–315) нм), достигающего поверхности Земли. Значения освещенности, соответствующие фиксированным зенитным углам Солнца (65, 75 и 85 градусов), соотнесены с суточным содержанием озона, которое измеряли с использованием различных приборов. Для зенитных углов Солнца при длине волны 306 нм коэффициент усиления излучения варьировался от 1,58 до 1,94, при 314 нм – от 0,68 до 0,88. Летом УФ-индекс достигал максимального уровня (8 ед.), что соответствует типичному летнему значению для мест, находящихся на средних широтах. Обнаружено, что интенсивность солнечного излучения, относящаяся к спектральному диапазону УФ-А (315–400 нм), зависит от изменений пропускающих характеристик атмосферы. При большей загрязненности атмосферы аэрозолями различного состава до поверхности Земли доходит меньшее количество излучения.

Основная дискуссия разворачивается вокруг излучения диапазона УФ-С. Озоновая дыра максимального размера расположена над Антарктидой, где постоянно проводится мониторинг состояния озонового слоя. Основным критерием оценки толщины озонового слоя является фиксация на земной поверхности излучения диапазона УФ-С [7].

В работе [8] представлены результаты многократных измерений, доказывающие, что излучение всех длин волн в спектральном диапазоне 200–400 нм достигает поверхности Земли. В работе [9] представлены результаты измерения излучения диапазона УФ-С на поверхности Земли.

Оценка уровня ультрафиолетового излучения на поверхности Земли

Жизнь на Земле и сохраняемость свойств большинства искусственных материалов в значительной степени зависят от природных процессов, которые защищают от опасного воздействия солнечной радиации. Первой линией защиты является геомагнитное поле, которое безопасно отклоняет основной удар заряженных частиц солнечного излучения от Земли [10]. Атмосфера Земли – это вторая линия обороны. Растения и животные защищены от УФ-излучения стратосферным озоновым слоем.

Широко распространено мнение, что озон и атмосферный кислород предотвращают попадание на поверхность Земли >90 % излучения диапазона УФ-В и 100 % излучения диапазона УФ-С (100–290 нм) [8, 11]. В течение последних десятилетий научное сообщество сосредоточило внимание на разрушении озонового слоя в связи с так называемой антарктической озоновой дырой и придерживалось теории, принятой

Монреальским протоколом 1987 г. Согласно данной теории, за разрушение озона в первую очередь ответственны хлорфторуглероды, участвующие в реакциях в верхних слоях атмосферы. Известны другие причины разрушения озонового слоя, в частности аэрозольная геоинженерия с использованием угольной летучей золы.

Необходимо отметить, что озон является продуктом взаимодействия УФ-излучения с кислородом, вырабатываемым фотосинтезирующими организмами. Изменение содержания озона свидетельствует о пониженном уровне излучения либо кислорода. Антарктида расположена на полюсе, имеет максимальный угол отклонения солнечного света, на континенте отсутствует растительность, поэтому озоновая дыра образовалась в результате дефицита УФ-излучения и кислорода. Основным фактором увеличения солнечной радиации УФ-спектра на поверхности Земли является отсутствие не озона, а достаточного количества кислорода.

В работах [12–15] опровергнуто утверждение, что излучение диапазона УФ-С и частично диапазона УФ-В не достигает поверхности Земли. На рис. 1 показаны значения спектральной освещенности, полученные с использованием типичного спектрального радиометра (зеленая и розовая кривые) [16] и экспериментального оборудования ИЛТ950UV с фракционным нанометровым разрешением в коротковолновой части УФ-спектра с отклонением рассеянного света $>99,7\%$ (черная и красная кривые) [17].

При использовании спектрального радиометра спектральную освещенность определяли в двух точках поверхности Земли, расположенных на 38 градусах южной (зеленая кривая) и северной широт (розовая кривая) [16]. Измерения с помощью оборудования ИЛТ950UV проводили в местоположении с координатами 37,517783 градуса северной широты и 120,856783 градуса западной долготы на высоте над уровнем моря 56 м 17 июня 2017 г. в 10 ч 49 мин (черная кривая) и 20 января 2018 г. в 12 ч 21 мин (красная кривая) по местному времени. Показано, что мощность солнечной радиации должна измеряться в $[мВт/(см^2 \cdot нм)]$.

На рис. 1 видно, что зеленая кривая охватывает больший диапазон УФ-излучений, чем розовая. Но гораздо важнее, что по сравнению с зеленой кривой красная и черная кривые распространяются на еще более широкий диапазон излучений. Измерения с высоким разрешением позволяют зафиксировать существенные различия данных кривых и подтверждают наличие на поверхности Земли излучения диапазонов УФ-В и УФ-С.

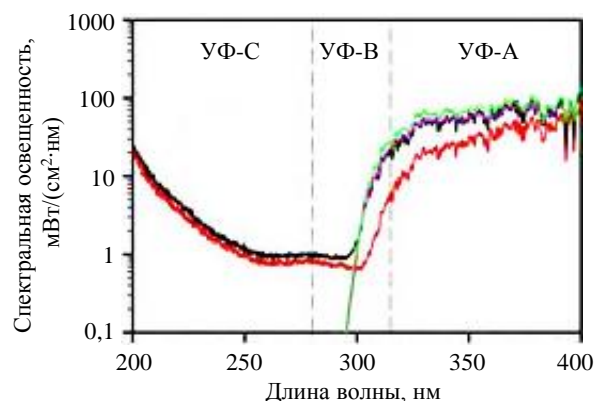


Рис. 1. Сравнение результатов измерения спектральной освещенности поверхности Земли, полученных с использованием спектрального радиометра (зеленая и розовая кривые) [16] и экспериментального оборудования ИЛТ950UV с фракционным нанометровым разрешением в коротковолновой части УФ-спектра с отклонением рассеянного света $>99,7\%$ (черная и красная кривые) [17]

Более 40 лет научное сообщество часто шло на поводу у политической конъюнктуры и игнорировало устоявшиеся стандарты [16]. Когда возникает существенное научное противоречие, ученые обязаны установить достоверность полученных данных и, если это оправдано, исправить ранее существовавшее понимание явления.

Авторы работы [17] измерили спектральную освещенность на горных склонах на Огненной Земле и в Аргентине на высоте над уровнем моря 245–655 м. С использованием спектрометра обнаружено излучение диапазона УФ-С. Это служит доказательством того, что данные, полученные другими исследователями при определении излучения диапазонов УФ-С и УФ-В, не были результатом ошибки измерения и отраженных сигналов. Точность спектрометра составляет ± 20 и ± 10 % в диапазонах длин волн 200–350 и 350–400 нм соответственно (рис. 2) [18].

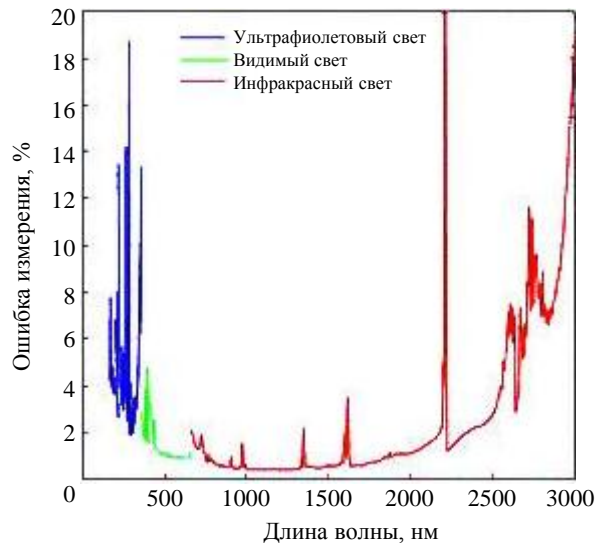


Рис. 2. Абсолютная неопределенность солнечного спектра. Абсолютные радиометрические шкалы установлены во время наземных калибровок с использованием абсолютно черного тела. Средняя абсолютная погрешность составляет 1,26 % от общей солнечной освещенности в диапазоне длин волн 165–3000 нм

Авторы работы [19] выполнили измерение солнечного спектра, охватывающего область длин волн 165–3000 нм. Спектральное разрешение варьировало от 0,6 до 9,5 нм. С помощью интегрального спектрометра определена общая солнечная освещенность, составившая $1372,3 \pm 16,9$ Вт/м², что на 11 Вт/м² превышает значение, рекомендованное в 2015 г. Международным астрономическим союзом.

Освещенность поверхности зависит от способности поглощать/отражать свет, которая определяется ее цветом. Поверхности черного, коричневого и фиолетового цветов отражают 6–10 % света, а белого, желтого и др. – до 70–90 %.

Авторы работ [20–22] опубликовали убедительные доказательства того, что аэрозольные частицы угольной летучей золы являются основными агентами, ответственными за разрушение стратосферного озона. Уголь в виде сажи, нанотрубок, фуллеренов и пр., галогены в виде хлоридов, фторидов, йодидов, оксиды металлов, минеральные оксиды, песок и некоторые компоненты угольной золы-уноса – основные источники аэрозоля, непосредственно уничтожающего озоновый слой [23].

В работе [24] получены данные, подтверждающие, что аэрозоли органических соединений, включая лигнин – основное связующее целлюлозы в древесине, часто смешиваются с аэрозолями угля и золы, активно взаимодействуют со стратосферным

озоном и кислородом, уменьшая их количество [25]. Таким образом, аэрозоли увеличивают поток УФ-излучения, достигающего поверхности Земли, но при этом аэрозольные частицы, особенно черного цвета, поглощают его.

В научно-технической литературе нет однозначного ответа на вопрос о наличии и численном значении светового потока диапазона УФ-С. Результаты большинства исследований свидетельствуют о близком к нулю значении светового потока диапазона УФ-С.

Процессы фотолиза, стимулирующие основные функции синтеза веществ в организме, происходят при облучении в диапазоне длин волн 250–320 нм с максимумами 250 и 297 нм для витаминов D₂ и D₃, 315–270 нм – витамина D₄, 280–340 нм – меланина.

Бактерицидное (абиотическое) действие радиации присуще областям УФ-С и УФ-В, охватывает диапазон длин волн от 300 до 180 нм с максимумом 254 нм (по другим данным, 253,7–267,5 нм). Под влиянием УФ-радиации сначала возникает раздражение бактерий с активацией их жизнедеятельности. С увеличением дозы УФ-радиации проявляется бактериостатический эффект, а затем происходят фотодеструкция, денатурация белков и гибель микроорганизмов.

Таким образом, УФ-излучение всех диапазонов (А, В и С) участвует в жизнедеятельности организмов, а значит доходит до поверхности Земли в различной степени. Длины волн, имеющие наибольшее значение, находятся в диапазоне 250–300 нм.

Влияние длины волны ультрафиолетового излучения на световое старение полимерных материалов

Основной причиной светового старения полимеров является фотолиз [24]. При поглощении кванта света молекуле сообщается энергия (чем выше частота, тем больше энергия), в результате увеличивается энергия внешних заполненных молекулярных орбиталей. Молекула становится более реакционноспособной – активируется. Таким образом инициируются фотохимические реакции, которые в отсутствие света не происходят.

Спектр солнечного света различается не только по частоте, но и по величине энергии фотонов. Энергия фотона равномерно снижается с 12,4 эВ (1200 кДж/моль) при длине волны 100 нм до 0,8 эВ (80 кДж/моль) при длине волны 1500 нм. Соответственно, более энергоемкие лучи УФ-диапазона оказывают максимальное воздействие на полимеры. Энергия излучения в области УФ-А достаточна для разрыва большинства ковалентных связей простых органических соединений, например –C=C– (145 ккал/моль), –C–H (98 ккал/моль), –C–C– (~80 ккал/моль), –C–O– (82 ккал/моль) [25].

Влияние УФ-излучения на процессы деградации материалов оценивают, измеряя спектры, при которых начинается активация полимерных молекул. Например, при длине волны 300 нм начинается разрушение полиэтилена, 370 нм – полипропилена, 310 нм – поливинилхлорида, 298 нм – ацетобутирата целлюлозы, 318 нм – полистирола.

Величина квантового выхода (отношение числа квантов света, вызывающих различные виды фотохимических реакций, к общему количеству поглощенных квантов) зависит от длины волны падающего света, наличия примесей в полимере и ненасыщенных химических связей в цепи (см. таблицу).

Квантовый выход при фотолизе различных полимеров

| Полимер | Длина волны, нм | Квантовый выход |
|----------------------|-----------------|-----------------|
| Полиэтилентерефталат | 280–360 | 0,0051 |
| Каучук | 250–400 | 0,0041 |
| Целлюлоза | 254 | 0,0100 |
| Полиметилметакрилат | 254 | 0,2200 |
| Полиэтилен | 250–350 | 0,0001 |

Низкий квантовый выход при фотолизе может быть связан с превращением большей части поглощенной световой энергии в теплоту.

В работе [26] показано, что взаимное расположение хромофорных групп в полимере влияет на сопротивление нагрузке при растяжении.

Включение фотохимически нейтрального фуллера C_{60} в качестве наполнителя в состав полиметилметакрилата или полиэтилена низкого давления оказывает светостабилизирующее действие за счет поглощения излучения [27].

Увеличение оптической плотности полимеров в УФ-области в процессе полимеризации, по-видимому, обусловлено микрогетерогенностью материалов. Согласно работам [28, 29], радикальная полимеризация акриловых олигомеров сопровождается формированием уже на ранних стадиях дискретных полимерных частиц (зерен) с прочно сшитым ядром и слабо сшитым промежуточным слоем. Сформированный полимерный материал (пленка) состоит из сросшихся плотных полимерных зерен (рассеивающих центров), разделенных менее плотными полимерными прослойками. Образование и рост полимерных зерен сопровождаются увеличением разности показателей преломления полимерных зерен и межзеренных прослоек [30, 31], что, в свою очередь, является одной из причин роста оптической плотности полимера.

На рис. 3 представлены спектры поглощения полимеров ТГМ-3 с различной степенью полимеризации. Кроме зависимости оптической плотности от степени полимеризации четко прослеживается связь оптической плотности и длины волны УФ-излучения. Максимальная проницаемость полимеров наблюдается при более низких частотах.

Таким образом, УФ-спектр в диапазоне длин волн 290–310 нм оказывает максимальное воздействие на полимеры. При проведении климатических испытаний частота данного спектра должна соответствовать частоте солнечного спектра на высоте от поверхности Земли.

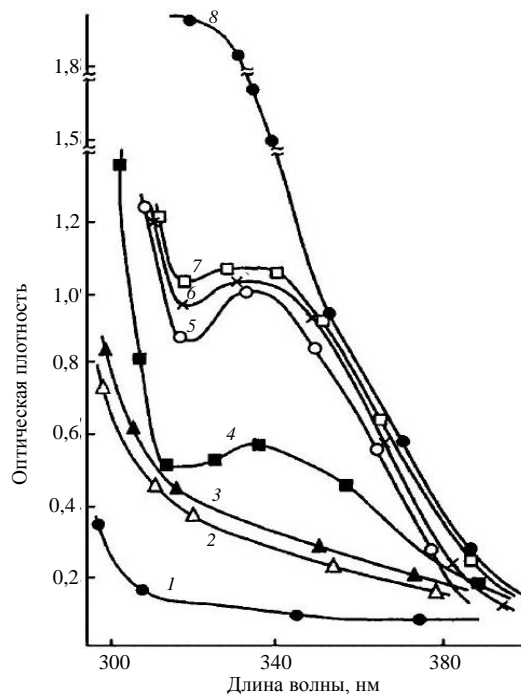


Рис. 3. Спектры поглощения полимера ТГМ-3 со степенью полимеризации 0 (1), 30 (2), 35 (3, 4), 40 (5), 48 (6), 55 (7) и 80 % (8). Концентрация фотоинициатора диметоксифенилацетофена составляет 0 (1–3) и 4 % (по массе) (4–8)

Как видно из рис. 3, спектр поглощения по мере увеличения степени полимеризации сдвигается в сторону больших длин волн, при этом энергия поглощения возрастает.

Искусственные источники ультрафиолетовой радиации

К искусственным источникам УФ-радиации относятся следующие виды ламп:

- прямые ртутно-кварцевые и дуговые ртутно-кварцевые, генерирующие излучение в диапазоне волн 240–380 нм;
- эритемные увиолевые (ЭУВ-15, ЭУВ-30, ЛЭ-30) – в диапазоне 285–380 нм;
- бактерицидные увиолевые (БУЛ-30, ЛБ-30) – в диапазоне 240–380 нм.

На рис. 4 приведены спектры излучения данных ламп. Ни один из источников света не имитирует в полной мере солнечное излучение. Соответственно, проведение экспериментов с их использованием дает приблизительное представление о характере и скорости старения полимерных материалов.

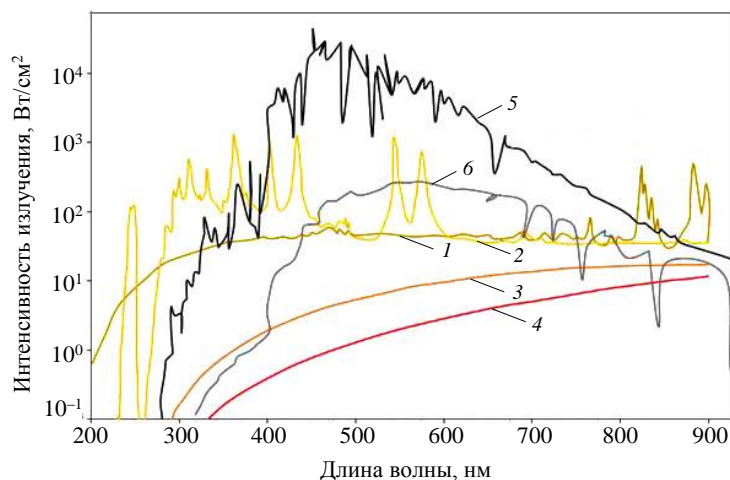


Рис. 4. Спектры излучения ртутной (1), ксеноновой (2), галогеновой напряжением 12 (3) и 8 В (4) ламп. Для сравнения приведены спектры солнечного излучения в космосе (5) и на поверхности Земли (6) [32]

Спектральный состав солнечного излучения зависит от многих факторов: географической широты, высоты над уровнем моря, времени суток, состава грунта (от воды отражается 7 % света, от снега – 80 %) и др.

В Технологическом институте Карлсруэ создан источник света, имитирующий солнечную радиацию на поверхности Земли [33]. Вместо источников света полного спектра использована комбинация светодиодов с узким спектром излучения, позволяющая получить комбинированный спектр, аналогичный солнечному, в диапазоне длин волн 300–530 нм.

Светодиоды представляют собой энергоэффективный, надежный и универсальный источник света, который можно использовать в широком диапазоне температур (вплоть до 90 °С), регулировать по интенсивности и ширине спектра, а также легко настраивать в соответствии с новыми технологическими разработками или научными потребностями. Освещение в камере характеризуется вертикальным градиентом интенсивности, т. е. мощность светового потока можно регулировать перемещением источника света в вертикальном направлении относительно испытываемого образца. Изменение интенсивности света при постоянной температуре не превышает 1 %. Интенсивность излучения светодиодов зависит от температуры, но, регулируя параметры источника света, можно адаптировать спектр к различным условиям.

Хотя освещение имитационной камеры вызывает повышение средней температуры образца материала, можно проводить эксперименты с водяными каплями при относительной влажности $\leq 95\%$, при использовании водяного тумана. Этот тип источника света позволяет проводить воспроизводимые эксперименты в широком диапазоне моделируемых атмосферных условий и контролировать спектры излучения.

На рис. 5 приведено сравнение спектров солнечного излучения (по ASTM G173-03) и излучения, полученного с использованием описанного набора светодиодов и двух УФ-светодиодов (275 и 290 нм). Данный комбинированный источник света позволяет получить излучение, максимально приближенное по частоте и интенсивности к реальному солнечному излучению.

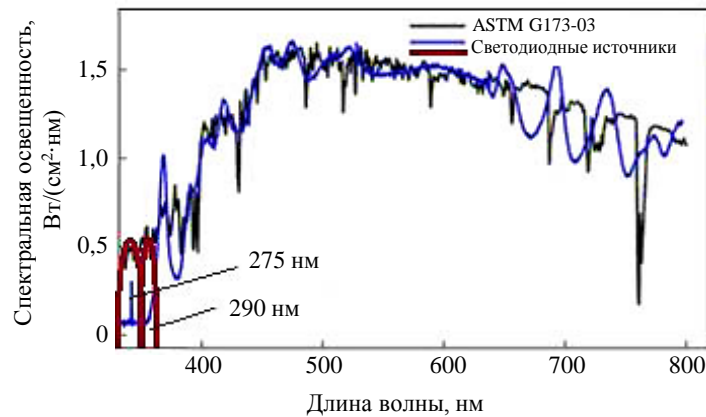


Рис. 5. Имитация спектра солнечного излучения с использованием набора светодиодных излучателей

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Заключения

В соответствии с ГОСТ 9.401–91 при климатических испытаниях материалов на стойкость к солнечному свету используют ксеноновые лампы, спектр освещения которых значительно выше по амплитудным значениям в УФ-диапазоне и значительно меньше – в видимом и инфракрасном диапазонах естественного солнечного излучения на уровне Земли. Кроме того, данные лампы имеют пиковые отклонения в видимом диапазоне, не соответствующие солнечному спектру.

Нормы средних показателей за последние несколько лет не отражают реальных значений солнечного излучения в момент испытаний и в будущем. Стойкость материалов к солнечному излучению следует прогнозировать с учетом оптимистических и пессимистических сценариев изменения климата в целом и уровня солнечного излучения в частности.

Загрязнение атмосферы аэрозольными частицами, особенно углеродными, значительно снижает количество света, падающего на поверхность Земли. Повышение температуры Земли приводит к увеличению количества водяного пара в атмосфере, который значительно снижает интенсивность некоторых частот видимого и инфракрасного излучения.

Современные источники света, такие как светодиоды, способны испускать свет широкого диапазона частот с достаточной дискретностью. С их помощью можно эффективно и с минимальной погрешностью имитировать спектр солнечного света.

Применение наборов светодиодов, имитирующих солнечное излучение, для лабораторных климатических испытаний, а также прогнозирование изменения солнечного спектра и интенсивности излучения в процессе изменения климата и загрязнения атмосферы позволят в значительной степени уменьшить ошибки при определении сохранности свойств материалов.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
4. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
5. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 2. Основные тенденции // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108.
6. Vitale V., Petkov B.H., Goutail F. Variations of UV irradiance at Antarctic station Concordia during the springs of 2008 and 2009 // *Antarctic Science*. 2011. Vol. 23 (04). P. 389–398. DOI: 10.1017/S0954102011000228.
7. Hoisington R.D., Whiteside M., Herndon J.M. Unequivocal Detection of Solar Ultraviolet Radiation 250–300 nm (UV-C) at Earth's Surface // *European Journal of Applied Sciences*. 2023. Vol. 11 (2). P. 455–472.
8. Herndon J.M., Hoisington R.D., Whiteside M. Deadly Ultraviolet UV-C and UV-B Penetration to Earth's Surface: Human and Environmental Health Implications // *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*. 2018. Vol. 14 (2). P. 1–11.
9. Чеснокова Т.Ю., Воронина Ю.В., Ченцов А.В. и др. Вычисление потоков солнечного излучения в УФ-диапазоне с различными сечениями поглощения озона и диоксида азота // *Математическая физика и компьютерное моделирование*. 2017. Т. 20. № 5. С. 76–88.
10. Cárcer I.A., Dantoni H.L., Barboza-Flores M. KCl: Eu²⁺ as a solar UV-C radiation dosimeter. Optically stimulated luminescence and thermoluminescence analyses // *Journal of Rare Earths*. 2009. Vol. 27 (4). P. 579–583.
11. D'Antoni H. Extreme environments in the forests of Ushuaia, Argentina // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34 (22). P. 95–120.
12. D'Antoni H.L., Rothschild L.J., Skiles J. Reply to comment by Stephan D. Flint et al. on «Extreme environments in the forests of Ushuaia, Argentina» // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35 (13). P. 574–581.
13. Ceballos G., Ehrlich P.R., Dirzo R. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114 (30). P. 6089–6096.
14. Living Planet Report 2020: Bending the Curve of Biodiversity Loss. Gland: WWF, 2020. 25 p.
15. Dirzo R. Defaunation in the Anthropocene // *Science*. 2014. Vol. 345 (6195). P. 401–406.
16. Herndon J.M., Williams D.D., Whiteside M. Previously unrecognized primary factors in the demise of endangered torrey pines: A microcosm of global forest die-offs // *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*. 2018. Vol. 16 (4). P. 1–14.

17. Zong Y. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers // *Applied optics*. 2006. Vol. 45 (6). P. 1111–1119.
18. Ravanat J.-L., Douki T. UV and ionizing radiations induced DNA damage, differences and similarities // *Radiation Physics and Chemistry*. 2016. Vol. 128. P. 92–102.
19. Meftah M., Damé L., Bolsée D. SOLAR-ISS: A new reference spectrum based on SOLAR/SOLSPEC observations? // *Astronomy Astrophysics*. 2018. Vol. 611. P. 33–38. DOI: 10.1051/0004-6361/201731316.
20. Herndon J.M., Whiteside M. Aerosolized coal fly ash particles, the main cause of stratospheric ozone depletion, not chlorofluorocarbon gases // *European Journal of Applied Sciences*. 2022. Vol. 10 (3). P. 586–603.
21. Whiteside M., Herndon J.M. Destruction of stratospheric ozone: Role of aerosolized coal fly ash iron // *European Journal of Applied Sciences*. 2022. Vol. 10 (4). P. 143–153.
22. Newman P.A., Oman L.D., Douglass A.R. et al. What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? // *Atmosphere Chemical Physics*. 2009. No. 9. P. 2113–2128.
23. Whiteside M., Herndon J.M. Humic like substances (HULIS): Contribution to global warming and stratospheric ozone depletion // *European Journal of Applied Sciences*. 2023. Vol. 11 (2). P. 325–346.
24. Herndon J.M. Obtaining evidence of coal fly ash content in weather modification (geoengineering) through analyses of post-aerosol spraying rainwater and solid substances // *Indian Journal Science, Research and Technology*. 2016. Vol. 4(1). Art. 30-6.
25. Вечканов Е.М., Внуков В.В. Термодинамика и кинетика биологических процессов: учеб. метод. пособие для вузов. Ростов н/Д: Копи-Центр, 2011. 53 с.
26. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
27. Истамов Ф., Дадоматов Х., Бобоев Т. Влияние растягивающей нагрузки на кинетику фотодеструкции полиметилметакрилата // *Доклады Академии наук Республики Таджикистан*. 2002. Т. 45. № 10. С. 76–80.
28. Берлин А.А., Королев Г.В., Кефели Т.Я., Севергин Ю.М. Акриловые олигомеры и материалы на их основе. М.: Наука, 1983. 320 с.
29. Электроизоляционная композиция УФ-отверждения: пат. SU 1483495 A1; заявл. 21.07.87; опубл. 30.05.89.
30. Семянников В.А. Исследование светорассеяния процесса формирования микрогетерогенной структуры сетчатых полимеров на основе олигоэфиракрилатов: дис. ... канд. хим. наук. Ярославль: Ярославск. политех. ин-т, 1988. 134 с.
31. Васильев Д.К. Изменение УФ-спектров в процессе фотоиницированной полимеризации метакрилатов: дис. ... канд. хим. наук. Ярославль: Ярославск. политех. ин-т, 1990. 125 с.
32. Tofa M., Djafar Z., Piarah W.H. A New Hybrid of Photovoltaic-thermoelectric Generator with Hot Mirror as Spectrum Splitter // *Journal of Physical Science*. 2018. Vol. 29 (Supp. 2). P. 63–75. DOI: 10.21315/jps2018.29.s2.6.
33. Magdalena V., Linyu G., Feng J. LED-based solar simulator to study photochemistry over a wide temperature range in the large simulation chamber AIDA // *Atmospheric measurement technology*. 2022. Vol. 15. P. 1795–1810.

References

1. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.

4. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1. Testing of new materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
5. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climatic factors (review). Part 2. Main trends. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108.
6. Vitale V., Petkov B.H., Goutail F. Variations of UV irradiance at Antarctic station Concordia during the springs of 2008 and 2009. *Antarctic Science*, 2011, vol. 23 (04), pp. 389–398. DOI: 10.1017/S0954102011000228.
7. Hoisington R.D., Whiteside M., Herndon J.M. Unequivocal Detection of Solar Ultraviolet Radiation 250–300 nm (UV-C) at Earth's Surface. *European Journal of Applied Sciences*, 2023, vol. 11 (2), pp. 455–472.
8. Herndon J.M., Hoisington R.D., Whiteside M. Deadly Ultraviolet UV-C and UV-B Penetration to Earth's Surface: Human and Environmental Health Implications. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 2018, vol. 14 (2), pp. 1–11.
9. Chesnokova T.Yu., Voronina Yu.V., Chentsov A.V. et al. Calculation of solar radiation fluxes in the UV range with different absorption cross sections of ozone and nitrogen dioxide. *Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie*, 2017, vol. 20, no. 5, pp. 76–88.
10. Cárcer I.A., Dantoni H.L., Barboza-Flores M. KCl: Eu²⁺ as a solar UV-C radiation dosimeter. Optically stimulated luminescence and thermoluminescence analyses. *Journal of Rare Earths*, 2009, vol. 27 (4), pp. 579–583.
11. D'Antoni H. Extreme environments in the forests of Ushuaia, Argentina. *Geophysical Research Letters*, 2007, vol. 34 (22), pp. 95–120.
12. D'Antoni H.L., Rothschild L.J., Skiles J. Reply to comment by Stephan D. Flint et al. on «Extreme environments in the forests of Ushuaia, Argentina». *Geophysical Research Letters*, 2008, vol. 35 (13), pp. 574–581.
13. Ceballos G., Ehrlich P.R., Dirzo R. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, vol. 114 (30), pp. 6089–6096.
14. Living Planet Report 2020: Bending the Curve of Biodiversity Loss. Gland: WWF, 2020, 25 p.
15. Dirzo R. Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 2014, vol. 345 (6195), pp. 401–406.
16. Herndon J.M., Williams D.D., Whiteside M. Previously unrecognized primary factors in the demise of endangered torrey pines: A microcosm of global forest die-offs. *Journal of Geography, Environmental and Earth Science International*, 2018, vol. 16 (4), pp. 1–14.
17. Zong Y. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers. *Applied optics*, 2006, vol. 45 (6), pp. 1111–1119.
18. Ravanat J.-L., Douki T. UV and ionizing radiations induced DNA damage, differences and similarities. *Radiation Physics and Chemistry*, 2016, vol. 128, pp. 92–102.
19. Meftah M., Damé L., Bolsée D. SOLAR-ISS: A new reference spectrum based on SOLAR/SOLSPEC observations? *Astronomy Astrophysics*, 2018, vol. 611, pp. 33–38. DOI: 10.1051/0004-6361/201731316.
20. Herndon J.M., Whiteside M. Aerosolized coal fly ash particles, the main cause of stratospheric ozone depletion, not chlorofluorocarbon gases. *European Journal of Applied Sciences*, 2022, vol. 10 (3), pp. 586–603.
21. Whiteside M., Herndon J.M. Destruction of stratospheric ozone: Role of aerosolized coal fly ash iron. *European Journal of Applied Sciences*, 2022, vol. 10 (4), pp. 143–153.
22. Newman P.A., Oman L.D., Douglass A.R. et al. What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? *Atmosphere Chemical Physics*, 2009, no. 9, pp. 2113–2128.
23. Whiteside M., Herndon J.M. Humic like substances (HULIS): Contribution to global warming and stratospheric ozone depletion. *European Journal of Applied Sciences*, 2023, vol. 11 (2), pp. 325–346.

24. Herndon J.M. Obtaining evidence of coal fly ash content in weather modification (geoengineering) through analyses of postaerosol spraying rainwater and solid substances. *Indian Journal Science, Research and Technology*, 2016, vol. 4(1), art. 30-6.
25. Vechkanov E.M., Vnukov V.V. *Thermodynamics and kinetics of biological processes: textbook for universities*. Rostov-on-Don: Copy-Center, 2011, 53 p.
26. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials: textbook*. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
27. Istamov F., Dadomatov X., Boboev T. Influence of tensile load on the kinetics of photodestruction of polymethyl methacrylate. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan*, 2002, vol. 45, no. 10, pp. 76–80.
28. Berlin A.A., Korolev G.V., Kefeli T.Ya., Severgin Yu.M. *Acrylic oligomers and materials based on them*. Moscow: Nauka, 1983, 320 p.
29. *UV-curing electrical insulating composition: pat. SU 1483495 A1; appl. 21.07.87; publ. 30.05.89.*
30. Semyannikov V.A. *Study of light scattering of the process of formation of microheterogeneous structure of network polymers based on oligoester acrylates: thesis, Cand. Sc. (Chem.)*. Yaroslavl: Yaroslavl Polytech Institute, 1988, 134 p.
31. Vasiliev D.K. *Changes in UV spectra during photoinitiated polymerization of methacrylates: thesis, Cand. Sc. (Chem.)*. Yaroslavl: Yaroslavl Polytech Institute, 1990, 125 p.
32. Tofa M., Djafar Z., Piarah W.H. A New Hybrid of Photovoltaic-thermoelectric Generator with Hot Mirror as Spectrum Splitter. *Journal of Physical Science*, 2018, vol. 29 (Supp. 2), pp. 63–75. DOI: 10.21315/jps2018.29.s2.6.
33. Magdalena V., Linyu G., Feng J. LED-based solar simulator to study photochemistry over a wide temperature range in the large simulation chamber AIDA. *Atmospheric measurement technology*, 2022, vol. 15, pp. 1795–1810.

Информация об авторах

Лаптев Анатолий Борисович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлов Михаил Рашитович, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зеленева Татьяна Олеговна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anatoly B. Laptev, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail R. Pavlov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tatiana O. Zeleneva, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.03.2024.
The article was submitted 22.02.2024; approved and accepted for publication after reviewing 20.03.2024.