

УДК 535.3

ФОТОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ И ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ
Савкова Е.Н., Чжан Ю., Баранов П.О.*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь***Аннотация.** Сделан краткий обзор состояния вопроса в области определения фотобиологических величин, фотобиологических единиц и путей и перспектив обеспечения их метрологической прослеживаемости.**Ключевые слова:** фотобиологическая величина, единица, эквивалент, весовая функция, метрологическая прослеживаемость.**PHOTOBIOLOGICAL UNITS AND THEIR METROLOGICAL TRACEABILITY****Saukova Y., Zhang Yun, Baranau P.***Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus***Abstract.** A brief overview of the state of the issue in the field of determining photobiological quantities, photobiological units and ways and prospects for ensuring their metrological traceability is made.**Key words:** photobiological value, unit, equivalent, weight function, metrological traceability.*Адрес для переписки: Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by*

Три единицы СИ – кандела, люмен, люкс, относят к фотобиологическим, поскольку они содержат физиологические весовые коэффициенты, связанные с особенностями человеческого зрения [1]. Так как ионизирующее излучение передает энергию облучаемому веществу, для описания таких величин используют понятие поглощенной дозы D – отношения переданной энергии к массе. По решению МКМВ в 2002 г. величина эквивалентной дозы представляет собой произведение поглощенной дозы D и числового коэффициента Q , который учитывает биологическую эффективность излучения и зависит от энергии и типа излучения [2]:

$$H = Q D. \quad (1)$$

Например, для расчета эритемной освещенности, E_{er} , от источника ультрафиолетового излучения, которая получается путем взвешивания спектральной освещенности на длине волны λ по эффективности излучения на этой длине волны, вызывающего эритему, и суммирования по всем длинам волн, присутствующим в спектре источника, во всем диапазоне длин волн спектра действия [2]:

$$E_{er} = \int E_{\lambda}(\lambda) s_{er}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $E_{\lambda}(\lambda)$ – спектральная интенсивность излучения на длине волны λ (обычно указывается в единице СИ Вт·м⁻² нм⁻¹); $s_{er}(\lambda)$ – спектральная весовая функция эритемы, выраженная в спектральной радиометрической системе и нормированная на 1 при ее максимальном спектральном значении.

Эритемная освещенность E_{er} , определенная таким образом, прослеживается к единице СИ Вт·м⁻². Фотохимические и фотобиологические

величины могут быть определены с использованием либо спектральной радиометрической системы, либо спектральной фотонной системы, что требует применения определенных весовых функций. Таким образом, по аналогии с уравнением (2), эритема, вызванная источником ультрафиолетового излучения, может быть охарактеризована в единицах спектральной системы распределения фотонов с использованием интенсивности излучения эритемных фотонов [2]:

$$E_{p,er} = \int E_{p,\lambda}(\lambda) s_{p,er}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $E_{p,\lambda}(\lambda)$ – спектральный поток фотонов на единицу площади при длине волны λ (обычно указывается в единице измерения с⁻¹ м⁻² нм⁻¹); $s_{p,er}(\lambda)$ – спектральная весовая функция эритемы, выраженная в системе распределения спектральных фотонов и нормированная на 1 при ее максимальном спектральном значении.

Интенсивность излучения эритемных фотонов, $E_{p,er}$, определенная таким образом, обычно указывается в с⁻¹·м⁻², поскольку количество фотонов безразмерно. Из уравнений (2) и (3) следует, что соотношение между выражениями для спектральной взвешенной величины в двух системах зависит как от спектральной формы $E_{\lambda}(\lambda)$, так и от спектра действия. Однако для общего процесса отклика A взаимосвязь между формами двух спектральных весовых функций $s_{p,A}(\lambda)$ и $s_{e,A}(\lambda)$ (в фотонной системе и радиометрической системе соответственно), которые могут быть использованы для описания эффекта, определяется [2]:

$$s_{p,A}(\lambda) = \gamma_A \cdot \frac{hc}{\lambda \cdot n_a(\lambda)} \cdot s_{e,A}(\lambda), \quad (4)$$

где γ_A – постоянная (указанная в единицах J⁻¹), не зависящая от спектральной освещенности $E_{\lambda}(\lambda)$,

которая удовлетворяет требованию установления максимального значения $s_{p,A}(\lambda)$ до 1; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; $n_a(\lambda)$ – показатель преломления в воздухе на данной длине волны λ .

Спектры действия определяются с точки зрения величины эффекта в зависимости от длины волны. Длина волны излучения зависит от показателя преломления среды, что означает, что значение спектра действия на любой указанной длине волны будет варьироваться в зависимости от среды, для которой определена эта длина волны. В общем случае рассматриваемой средой является воздух, и упомянутые выше спектры действия CIE применимы для длин волн, измеренных в воздухе. Спектральные весовые функции $s_{p,A}(\lambda)$ и $s_{e,A}(\lambda)$, описывающие один и тот же эффект, различны по форме, и пиковая длина волны эффекта различна, когда выражается в количествах фотонов или радиометрических величинах.

Метрологическая прослеживаемость в биологических стандартных образцах. В работе [3] применительно к исследованиям гормона роста человека с учетом рекомендаций ISO 17511:2020 предложена концепция референтной системы, включающей референтный стандартный образец референтный метод и референтную лабораторию. Практическая реализация системы предполагает присвоение числового значения референтному образцу (например, биологического материала человека) через его калибровку путем определение «реальных» значений с использованием эталонного метода (GC-MS) или измерение клинических образцов радиоиммунологическим (перекрестные ссылки обеспечивают коммутативность). При этом производительность референтного метода «должна быть полностью определяемым письменным стандартом, способным измерять в абсолютных величинах уровни анализируемого вещества в клинических образцах» [3]. Метрологическая прослеживаемость значений количеств в образцах человека согласно ISO 17511:2020 распространяется на самый высокий доступный компонент системы отчета, в идеале на RMP и сертифицированные эталонные материалы (CRM).

Однако стандарт ISO 17511:2020 не распространяется на свойства, указанные в виде номинальных и порядковых шкал, где величина не задана. По мнению автора [3], предположение, что где это возможно, для калибровки эталонных препаратов следует использовать процедуры, сообщающие единицы SI, может быть ошибочным. В области медицинской диагностики и терапии для количественной оценки биологической активности определенных веществ также используется класс единиц, которые пока еще не

могут быть выражены в единицах SI. Это объясняется тем, что механизм специфического биологического действия этих веществ еще недостаточно изучен, чтобы его можно было измерить с точки зрения физико-химических параметров. В виду их важности для охраны здоровья и безопасности, Всемирная организация здравоохранения – ВОЗ (WHO) взяла на себя ответственность по определению Международных единиц ВОЗ – WHO IU – для биологической активности таких веществ.

Многие биологические вещества существуют как в активном, так и в неактивном состоянии в плазме, где активность отражает клиническую ситуацию пациента. Калибровка в менее точных биологических единицах была бы более подходящей, чем калибровка в более точных, клинически не относящихся к делу единицах SI. Единицу SI не следует считать метрологически превосходящей в силу ее большей точности [3].

Для решения этой проблемы на 24-м заседании (19–20 сентября 2019 г.) Консультативного комитета по фотометрии и радиометрии МБМВ была отмечена необходимость привлечения к сотрудничеству других организаций в области освещения, химии и биологии, в частности, Международной комиссии по освещению (МКО), которая опубликовала пять функций широкополосной чувствительности фоторецепторов сетчатки глаза человека (S, L, M, ipRGC и палочек) α -оптической спектральной эффективности $N_\alpha(\lambda)$ α -оптической эквивалентной освещенности: цианоптического E_{sc} , хлоропного E_{mc} , эритропозитинового E_{lc} , меланопатийного E_z , родопического E_r излучений [4]. Соответственно предложены фотобиологические единицы данных величин – эквиваленты люкса: 1) цианоптический sc-lx, 2) хлоропный mc-lx, 3) эритропозитиновый lc-lx, 4) меланопатийный z-lx, 5) родопический r-lx, которые прослеживаются к единицам SI посредством коэффициента невидимой спектральной эффективности $K_N \approx 73\,000 \alpha\text{-лм}\cdot\text{Вт}^{-1}$.

Литература

1. Международная система единиц (SI) : издание 9-е / 2019 г. – Федеральное Агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва: Росстандарт. – 100 с.
2. SI Brochure – 9-th edition (2020) – Appendix 3 v1.02. Appendix 3. Units for photochemical and photobiological quantities. – 2021.
3. Units and traceability in biological reference materials [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bipm.org/en/cc/JCTLM>. – Дата доступа: 01.10.2021.
4. Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry : CIE TN 003:2015. – 2013. – 35 p.