

EDN: <https://elibrary.ru/mizyhp>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-3-158-163>

УДК 613.648.2

© Коллектив авторов, 2024

Пальцев Ю.П.¹, Походзей Л.В.^{1,2}, Желтов Г.И.³**Опасность инфракрасного лазерного излучения для органа зрения**¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда им. академика Н.Ф. Измерова», пр-т Будённого, 31, Москва, 105275;²ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 2-4, Большая Пироговская ул., Москва, 119991;³ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова» НАН Беларуси, пр-т Независимости, 68-2, Минск, Республика Беларусь, 220072

Введение. Инфракрасные лазеры находят все более широкое применение в различных сферах деятельности человека. Постоянно возрастающая мощность лазерных установок приводит к увеличению риска здоровью больших контингентов работников. Действующие в настоящее время гигиенические нормативы не обеспечивают должной защиты глаз от вредного воздействия данного фактора.

Цель исследования — научное обоснование совершенствования предельно допустимых уровней (ПДУ) инфракрасного лазерного излучения.

Материалы и методы. Использованы аналитические методы для обобщения и систематизации результатов экспериментальных исследований и математического моделирования для определения порогов вредного действия инфракрасного лазерного излучения на ткани глазного яблока.

Результаты. Показано, что дальнейшее инфракрасное лазерное излучение может представлять опасность не только для роговицы, но и для сетчатки глаза. Одним из важных показателей, влияющих на глубину проникновения лазерного излучения в структуры глаза и тяжесть поражений, является коэффициент поглощения среды. На основе математического моделирования термохимической деструкции тканей глаза были определены пороги вредного действия дальнего инфракрасного лазерного излучения, подтверждённые результатами экспериментальных исследований. Обоснована необходимость введения более высокого коэффициента гигиенического запаса при определении ПДУ. Рекомендованы новые предложения по гигиенической регламентации лазерного излучения дальнего инфракрасного диапазона.

Заключение. Внедрение новых ПДУ позволит обеспечить более надёжную защиту глаз от дальнего инфракрасного лазерного излучения.

Этика. Данное исследование не требовало заключения этического комитета.

Ключевые слова: лазерное излучение; инфракрасный диапазон; порог вредного действия; роговица; сетчатка; коэффициент гигиенического запаса; предельно допустимые уровни

Для цитирования: Пальцев Ю.П., Походзей Л.В., Желтов Г.И. К вопросу об опасности инфракрасного лазерного излучения для органа зрения. *Мед. труда и пром. экол.* 2024; 64(3): 158–163. <https://elibrary.ru/mizyhp> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-3-158-163>

Для корреспонденции: Походзей Лариса Васильевна, e-mail: Lapokhodzey@yandex.ru

Участие авторов:

Пальцев Ю.П. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста, редактирование;

Походзей Л.В. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста, редактирование;

Желтов Г.И. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 04.03.2024 / Дата принятия к печати: 14.03.2024 / Дата публикации: 05.04.2024

Yuriy P. Paltsev¹, Larisa V. Pokhodzey^{1,2}, Georgij I. Zheltov³**The danger of infrared laser radiation to the organ of vision**¹Izmerov Research Institute of Occupational Health, 31, Budyonnogo Ave., Moscow, 105275;²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, 2-4, Bolshaya Pirogovskaya St., Moscow, 119991;³B.I. Stepanov Institute of Physics of The National Academy of Sciences of Belarus, 68-2, Nezavisimosti Ave., Minsk, Belarus, 220072

Introduction. The article tells about the widespread use of infrared lasers in the fields of human activity. The constantly increasing power of laser installations leads to an increased risk to the health of large groups of workers. Current hygiene standards do not provide adequate eye protection from the harmful effects of this factor.

The study aims are a scientific justification for improving the maximum permissible level (MPL) of infrared laser radiation.

Materials and methods. To generalize and systematize the results of experimental studies and mathematical modeling to determine the threshold values of the harmful effects of infrared laser radiation on eyeball tissue, the authors used analytical methods.

Results. Far infrared laser radiation can pose a danger not only to the cornea, but also to the retina. One of the important indicators affecting the depth of penetration of laser radiation into the structures of the eye and the severity of lesions is the absorption coefficient of the medium. Based on mathematical modeling of the thermochemical destruction of eye tissues, the researchers determined the threshold values of the harmful effects of far-infrared laser radiation, confirmed by the results of experimental studies. The scientists justified the need to introduce a higher coefficient of hygienic reserve in determining the maximum permissible level and recommended new proposals for the hygienic regulation of far-infrared laser radiation.

Conclusion. The introduction of new maximum permissible levels will provide more reliable eye protection from far infrared laser radiation.

Ethics. This study did not require the conclusion of the Ethics committee.

Keywords: laser radiation; infrared range; threshold of harmful effect; cornea; retina; coefficient of hygienic reserve; maximum permissible levels

For citation: Paltsev Yu.P., Pokhodzey L.V., Zheltov G.I. The danger of infrared laser radiation to the organ of vision. *Med. truda i prom. ekol.* 2024; 64(3): 158–163. <https://elibrary.ru/mizyhp> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-3-158-163> (in Russian)

For correspondence: Larisa Vasilyevna Pokhodzey, e-mail: Lapokhodzey@yandex.ru

Contribution:

Paltsev Yu.P. — the concept and design of the study, data collection and processing, writing, editing;

Pokhodzey L.V. — research concept and design, data collection and processing, text writing, editing;

Zhel'tov G.I. — concept and design of research, data collection and processing.

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 04.03.2024 / Accepted: 14.03.2024 / Published: 05.04.2024

Введение. Источники лазерного излучения (ЛИ) инфракрасного (ИК) диапазона нашли широкое применение в различных сферах деятельности человека. В зависимости от биологического действия ИК ЛИ в его спектре принято выделять 2 диапазона: ближний (от 0,75 мкм до 1,4 мкм) и дальний (от 1,4 мкм до 1 мм).

ИК-лазеры используются в промышленности для обработки различных материалов (резка, сверление, сварка), в медицинской практике для лечения и диагностики (офтальмология, онкология, косметология), в сложных системах вооружения для обнаружения и поражения техники и объектов, для передачи и приёма информации, в научных исследованиях, в том числе при развитии квантовой фотоники, в системах лазерного термоядерного синтеза, для мониторинга загрязнения окружающей среды, в геодезии и строительстве [1–6]¹.

Увеличение количества и мощности источников ИК-лазерного излучения, появление лазерных устройств, использующих новые длины волн данного диапазона (2,8–3,6 мкм и 8–12 мкм), новых режимов генерации приводит к росту числа лиц, которые могут подвергаться его воздействию на рабочих местах и в среде обитания. Многолетние научные исследования, проведённые у нас в стране и за рубежом, показали, что ИК-излучение может представлять значительную опасность для здоровья человека, прежде всего для органа зрения и кожных покровов [7–11]. В соответствии с приказом Министерства здравоохранения и социального развития РФ № 417 н от 27 апреля 2012 г. заболевания, связанные с воздействием лазерного излучения, включены в Перечень профессиональных заболеваний (п. 2.1.4)².

В настоящее время в РФ основным нормативным документом, устанавливающим предельно допустимые уровни (ПДУ) ЛИ, включая ИК-диапазон, на рабочих местах и в окружающей среде, являются СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Представленные в них гигиенические нормативы ИК ЛИ разработаны ещё в 80-х годах на основе упрощённых математических моделей и ограниченного объёма исследований деструктивного действия лазерного излучения на роговицу. За прошедшее время опубликовано большое количество работ, в которых представлены новые научные данные о механизмах действия и зависимостях биоэффектов от длины волны и энергетических параметров дальнего ИК ЛИ, свидетельствующих о необходимости пересмотра гигиенических регламентов [12–18].

Цель исследования — научное обоснование совершенствования ПДУ лазерного излучения инфракрасного диапазона.

¹ Евтихий Н.Н., Очин О.Ф., Бегунов И.А. Лазерные технологии: Учебное пособие. Долгопрудный: 2020.

² Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ № 417 н от 27 апреля 2012 г. «Об утверждении перечня профессиональных заболеваний»

Результаты и обсуждение. Специфические особенности строения органа зрения определяют особую чувствительность глаз к действию ЛИ. Локализация и степень выраженности патологических изменений в различных структурах глаза при воздействии прямого, зеркально и диффузно отражённого лазерного пучка в значительной мере зависят от конкретных физических характеристик: длины волны λ (нм, мкм), мощности P (Вт, мВт), энергии Q (Дж, мДж), режима генерации (импульсный или непрерывный).

Лазерное излучение, генерируемое в ближней ИК области, проходя через передние среды глаза (роговица, хрусталик, стекловидное тело), практически прозрачные в этом диапазоне, достигает сетчатки, фокусируясь в пятно чрезвычайно малых размеров (диаметром 10–20 мкм), что может привести к её ожогу даже при незначительной мощности ЛИ, и как следствие к полной потере зрения. С учётом этого факта для этой части спектра ЛИ при воздействии на глаза (для защиты глаз) установлены значительно более жёсткие ПДУ по сравнению с таковыми для кожных покровов (СанПиН 1.2.3685-21).

Традиционно считалось, что ЛИ в дальнем ИК диапазоне вызывает прежде всего повреждение роговицы, поскольку соответствующие спектральные коэффициенты поглощения в переднем отрезке глазного яблока достаточно велики, тем самым, не представляя опасности для сетчатки. В ныне действующем СанПиН 1.2.3685-21 для глаз и кожных покровов в этом диапазоне установлены единые ПДУ.

Вместе с тем, анализ результатов научных исследований, представленных в работах [19–22], показал, что элементы структуры глаза от роговицы до сетчатки представляют собой слабо рассеивающие среды, спектр поглощения которых в рассматриваемом интервале длин волн (800–2400 нм) близок спектру поглощения воды (рис. 1).

Как видно из рис. 1, в ближнем диапазоне ИК диапазоне (800–1350 нм) спектральные коэффициенты поглощения среды k , м^{-1} очень малы, что свидетельствует

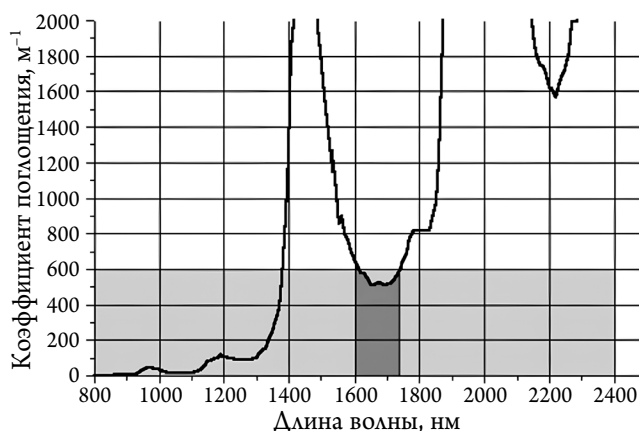


Рис. 1. Спектр поглощения воды в ИК диапазоне
Fig. 1. The absorption spectrum of water in the infrared range

о том, что это излучение может достигать сетчатки. Начиная с длины волны 1350–1400 нм коэффициент поглощения среды k резко возрастает от 600 до более 2000 м^{-1} , что подтверждает ранее полученные данные о поглощении дальнего ИК ЛИ в основном в переднем отрезке глаза. Однако в диапазоне длин волн 1600–1750 нм коэффициент поглощения среды k резко снижается до 500–600 м^{-1} , что позволяет вновь говорить о возможности повреждения сетчатки.

Если спектральный коэффициент поглощения среды k , м^{-1} , относительно невелик (порядка 100–1000 м^{-1}), распространение излучения сопровождается двумя противоположными процессами: с одной стороны, последовательным ростом облучённости E , $\text{Вт}/\text{м}^2$ (энергетической экспозиции H , $\text{Дж}/\text{м}^2$) на оси пучка за счёт фокусировки, с другой — её уменьшением, связанным с оптическим поглощением. Эта конкуренция является одной из специфических особенностей распространения и, как следствие, деструктивного действия ИК излучения на глаза.

Так, для k меньше 100 м^{-1} облучённость тканей мягко возрастает по мере распространения сфокусированного светового потока внутри глаза. При дальнейшем увеличении k оптическое поглощение постепенно становится доминирующим процессом. Для $100 < k < 500 \text{ м}^{-1}$ характерно повышение пространственной селективности воздействия излучения на ткани в фокусе пучка. Например, для $k=300 \text{ м}^{-1}$ облучённость сетчатки более чем на 2 порядка выше облучённости роговицы, в то время как стекловидное тело на большей части остаётся практически интактным, его световая нагрузка примерно в 10 раз ниже, чем у сетчатки.

Поскольку физический и моральный ущерб, наносимый человеку при повреждении сетчатки, неизмеримо выше, чем при повреждении роговицы глаза, действующие нормативные значения ПДУ ЛИ в интервале 1500–1800 нм должны быть пересмотрены в сторону их ужесточения.

Базовым физическим процессом, приводящем, в конечном счёте, к изменениям нативной структуры биологических тканей глаза, включая сетчатку, является конверсия энергии лазерного излучения в тепловую энергию. При продолжительности облучения в интервале примерно 10^{-6} –1 сек. основной причиной таких первичных изменений является термохимическая денатурация биоструктур. Если длительность лазерного импульса меньше 10^{-6} с, часть энергии ЛИ, поглощённой средой, трансформируется в энергию колебаний (ударных волн), которые при достаточной мощности вызывают механические разрушения структурных элементов биоткани [13–16].

На основе анализа этих процессов была построена математическая модель фотостимулированной первичной деструкции тканей глаза в указанных интервалах длительности экспозиций. В дальнейшем она была откорректирована на основе ширококомасштабных экспериментальных исследований *in vivo* (кролики, приматы) и послужила научным фундаментом для определения зависимостей так называемых пороговых энергетических экспозиций $H_{\text{пор}}(t, k)$ от продолжительности однократного облучения глаз t и спектрального коэффициента поглощения тканей k .

Пороговые энергетические экспозиции — это такие значения энергетических характеристик ЛИ, воздействие которого на ткани глаз вызывает минимальные, офтальмо-скопически наблюдаемые, необратимые изменения тканей

с вероятностью 50% — $H_{\text{пор}}(50)$. Исходные характеристики светового потока измеряются в плоскости роговицы глаза.

Расчётные зависимости пороговой энергетической экспозиции $H_{\text{пор}}(50)$ тканей роговицы от коэффициентов поглощения, соответствующих длине волны от 1,4 до 11 $\mu\text{м}$, при разной длительности импульсов представлены на **рисунке 2**: порог вредного действия с уменьшением длительности лазерного импульса и с увеличением коэффициента поглощения (k) снижается.

Сравнительная оценка результатов расчёта пороговой энергетической экспозиции с экспериментальными данными показала хорошее совпадение полученных значений, что свидетельствует о правомерности использования данной расчётной модели при установлении $H_{\text{пор}}(50)$. Так, например, для гольмиевого лазера (длина волны излучения — 2080 нм, спектральный коэффициент поглощения тканей роговицы — 29 см^{-1} , длительность импульса — 10^{-4} с) расчётное значение пороговой энергетической экспозиции $H_{\text{пор}}(50)$ составило 3,1 $\text{Дж}/\text{см}^2$, а в эксперименте — 2,9 $\text{Дж}/\text{см}^2$.

При обосновании ПДУ лазерного излучения ИК диапазона, представленных в СНиП № 5804-91 и оставшихся неизменными и в ныне действующем СанПиН 1.2.3685-21, были использованы неоправданно малые коэффициенты гигиенического запаса, значения которых не превышали 2–5 раз.

Вместе с тем, результаты математического моделирования и проведённые экспериментальные исследования биологического действия дальнего ИК лазерного излучения позволили уточнить пороговые значения энергетических экспозиций $H_{\text{пор}}(50)$ для ряда длин волн (1,47 $\mu\text{м}$, 2,09 $\mu\text{м}$ и 2,94 $\mu\text{м}$), установив более жёсткие требования для роговицы глаза [14, 17, 18]. С учётом возможности реального повреждения сетчатки глаз предлагаем при обосновании ПДУ применить более надёжный коэффициент гигиенического запаса K , равный 10.

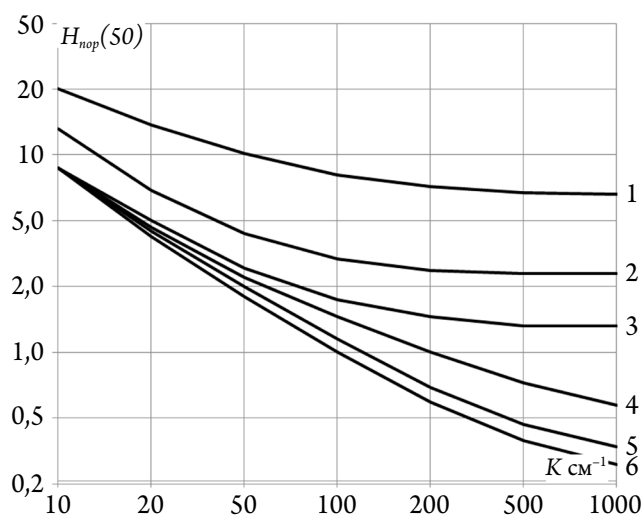


Рис. 2. Расчётные зависимости пороговой энергетической экспозиции в $\text{Дж}/\text{см}^2$ для роговицы глаза от спектрального коэффициента поглощения для следующих длительностей лазерного импульса: 1 с (1), 0,1 с (2), 10^{-2} с (3), 10^{-3} с (4), 10^{-4} с (5), 10^{-5} с (6)

Fig. 2. Calculated dependences of the threshold energy exposure in J/cm^2 for the cornea of the eye by the spectral absorption coefficient at laser pulse duration: 1 s (1), 0.1 s (2), 10^{-2} s (3), 10^{-3} s (4), 10^{-4} s (5), 10^{-5} s (6)

$H_{\text{ПДУ}}$ при однократном воздействии на глаза дальнего ИК лазерного излучения
 H_{MPL} with a single exposure to far infrared laser radiation on the eyes

Спектральный интервал λ , нм	Длительность облучения t , с	НПДУ, Дж/м ²
$1400 < \lambda \leq 1500$ $1800 < \lambda \leq 2500$	$10^{-10} < t \leq 0,1$	$2,5 \cdot 10^3 \cdot \sqrt[3]{t}$
	$0,1 < t \leq 10^2$	$5,0 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$5,0 \cdot 10^2 \cdot t$
$1500 < \lambda \leq 1800$	$10^{-10} < t \leq 10$	$10^4 \cdot \sqrt[3]{t}$
	$10 < t \leq 10^2$	$5,0 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$5,0 \cdot 10^2 \cdot t$
$2500 < \lambda \leq 105$	$10^{-10} < t \leq 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^2 \cdot \sqrt[3]{t}$
	$10^{-3} < t \leq 10^2$	$5,0 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{t}$
	$t > 10^2$	$5,0 \cdot 10^2 \cdot t$
$W_{\text{ПДУ}} = 10^{-6} H_{\text{ПДУ}}; P_{\text{ПДУ}} = W_{\text{ПДУ}}/t$		

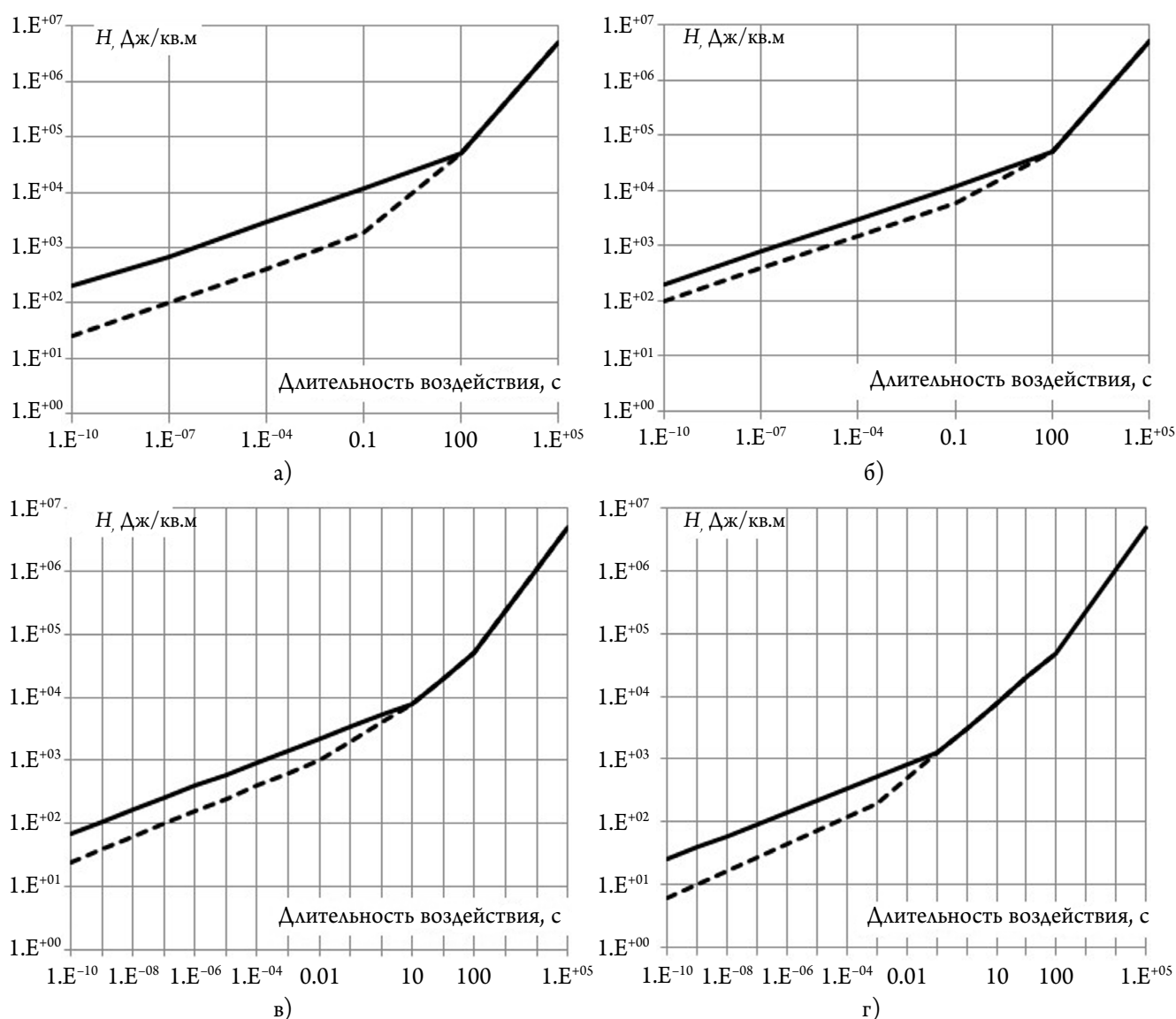


Рис. 3. Зависимость ПДУ энергетической экспозиции на поверхности роговицы от длительности воздействия в диапазонах: $\geq 1400-1500$ нм (а), $\geq 1500-1800$ нм (б), $\geq 1800-2500$ нм (в) и $\geq 2500-105$ нм (г) (сплошная линия — по СанПиН 1.2.3685-21, пунктир — наши предложения).

Fig. 3. Dependence HMPL on the surface of the cornea on the duration of exposure in the ranges: $\geq 1400-1500$ nm (a), $\geq 1500-1800$ nm (b), $\geq 1800-2500$ nm (c) and $\geq 2500-105$ nm (d) (solid line — according to SanPiN 1.2.3685-21, dotted line — our proposals).

$$H_{ndy}(t, \lambda) < H_{пор} 50(t, k) / K.$$

В **таблице** приведены обоснованные ПДУ энергетической экспозиции ЛИ (НПДУ) при однократном воздействии на глаза коллимированного или рассеянного лазерного излучения в спектральном диапазоне $1400 < \lambda < 105$ нм.

На **рисунке 3** представлено сравнение значений ПДУ энергетической экспозиции при однократном воздействии на глаза коллимированного или рассеянного лазерного излучения дальнего ИК диапазона, рассчитанных по СанПиН 1.2.3685-21 и нашим предложениям.

Предложенные ПДУ ЛИ являются более жёсткими как по сравнению с СанПиН 1.2.3685-21 (в спектральных диапазонах 1400–1500 нм и 1500 до 1800 нм — в 2–8 раз, а в спектральных диапазонах 1800–2500 нм и >2500 до

105 нм — 2–4 раза при длительности воздействия от $1 \cdot 10^{-10}$ до $\leq 0,1$ с), так и с зарубежными рекомендациями [23–26].

Заключение. Проведённые исследования показали, что ИК лазерное излучение может представлять серьёзную опасность как для роговицы, так и сетчатки глаза. Действующий в настоящее время СанПиН 1.2.3685-21 не обеспечивает надёжную защиту глаз от ЛИ с длиной свыше 1400 нм. Предложены новые, более жёсткие, научно обоснованные ПДУ в этом спектральном диапазоне, которые включены в проект ГН «Гигиенические нормативы лазерного излучения», разработанный ФГБНУ «НИИ МТ» совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана и Институтом физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси и представленный в Государственную комиссию по санитарно-эпидемиологическому нормированию Роспотребнадзора.

Список литературы

- Haas J. and Mizaikoff B. Advances in mid-infrared spectroscopy for chemical analysis. *Annual Review of Analytical Chemistry*. 2016; 9: 45–68.
- Tittel F.K. Mid-infrared Laser Based Gas Sensor Technologies for Environmental Monitoring, Medical Diagnostics, Industrial and Security Applications. In: *Terahertz and Mid Infrared Radiation: Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz)*. 2014: 153–165. <https://clck.ru/39Wa3V>
- Henderson B. et al. Laser spectroscopy for breath analysis: towards clinical implementation. *Applied physics B*. 2018; 124: 1–21.
- Pleitez M.A. et al. Label-free metabolic imaging by mid-infrared optoacoustic microscopy in living cells. *Nature biotechnology*. 2019; 38: 293–296.
- Amini-Nik S. et al. Ultrafast Mid-IR laser scalpel: Protein signals of the fundamental limits to minimally invasive surgery. *PLoS ONE*. 2010; 5: e13053.
- Hecht J. Photonic Frontiers: Laser countermeasures: scaling down mid-IR laser countermeasures for smaller aircraft. *Laser focus world*. 2014. <https://clck.ru/39WZzb>
- Пальцев Ю.П., Желтов Г.И., Комарова А.А. Биологические эффекты и критерии оценки опасности лазерного излучения. *Вестник академии медицинских наук*. 1992; 1: 17–21.
- Пальцев Ю.П. Эффекты воздействия лазерного излучения. В кн.: Крутиков В.Н. и др. ред. *Воздействие на организм человека опасных и вредных производственных факторов. Медико-биологические и метрологические аспекты*. Т.1; М.: ИПК Изд-во стандартов; 2004: 170–189.
- Andrikopoulos A., Thanopoulos I. Biological effects of laser irradiation and occupational safety. *Electromagnetic Radiation: History, Theory and Research*. 2018: 135–156.
- Thanos S., Böhm M., Meyer zu Hörste M., Schmidt P.F. Retinal damage induced by mirror-reflected light from a laser pointer. *BMJ Case Rep*. 2015: bcr2015210311. <https://doi.org/10.1136/bcr-2015-210311>
- Преображенский П.В., Шостак В.И., Балашевич Л.И. *Световые повреждения глаз*. Л.: Медицина, 1986.
- Кибовский В.Т., Кухтевич В.И., Новицкий Л.А., Оценка степени опасности направленных лазерных пучков для глаз человека. *Квантовая электроника*. 1980; 7(12): 2523–2529.
- Подольцев А.С., Желтов Г.И. Влияние инфракрасного излучения на роговицу. *Квантовая Электроника*. 1989; 16(10): 2136–2140.
- Подольцев А.С., Желтов Г.И. Математическое моделирование предельно допустимых уровней лазерного инфракрасного облучения роговицы глаза. *Гигиена труда и профессиональные заболевания*. 1992; 6: 42–43.
- Zheltoz G.I., Glazkov V.N., Kirkovsky A.I., Podol'tsev A.S. Mathematical Models of Laser-Tissue Interactions for Treatment and Diagnosis in Ophthalmology. In: *Laser Application in Life Sciences, Part two: Lasers in Biophysics and Biomedicine, Pros. SPIE*. 1990; 1403: 752–753.
- Zheltoz G.I. The laser Safety Norms of the Former Soviet Union. *Proceedings of the International Laser Safety Conference ILSC 97, Orlando, Laser Institute of America*, 1997; 3: 189–198.
- Подольцев А.С., Желтов Г.И., Привалов А.П., Чечин П.П. Макрокинетика термической денатурации при инфракрасном лазерном облучении роговицы глаза. В кн.: *V Минский международный форум по тепло- и массообмену*. Минск. 2004; 2: 157–158.
- Александров С.И., Карпович В.В., Кольцов А.А., Кузнецова Н.Ю., Новиков С.А., Кутлеев А.А. Часть III. Экспериментальная оценка особенностей воздействия на глаз лазерного излучения среднего инфракрасного диапазона. *Офтальмологические ведомости*. 2011; IV(4): 4–15.
- Hale G.M., Querry M.R. Optical Constants of Water in the Band from 0.2 μ m to 200 μ m. *Appl. Opt.* 1973; 12(3): 552–563.
- Van den Berg T.J., Spekrijse H. Near Infrared Light Absorption in the Human Eye Media. *Vision Res*. 1997; 37(2): 249–253.
- Sliney D., Wolbarsht M. Safety with Lasers and Other Optical Sources. *A Comprehensive Handbook*, Plenum Press. 1982. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4899-3596-0>
- Тучин В.В., Шубочкин А.П. Применение лазеров в офтальмологии. Ч.1. Взаимодействие оптического излучения с тканями глаза. *Обзоры по электронной технике, Сер. 11. Лазерная техника и оптоэлектроника*. М.: ЦНИИ Электроника. 1984; 2(1037): 1982–51.
- ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μ m. *Health Phys*. 2013; 105(3): 271–295.
- 21 CFR § 1040.10 – Laser products. <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/21/1040.10> (Доступ 27.02.2024).
- Походзей Л.В., Пальцев Ю.П. Современное состояние гигиенического нормирования лазерного излучения в Российской Федерации и за рубежом (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2022; 101(12): 1464–1468. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-12-1464-1468>
- Пальцев Ю.П., Походзей Л.В. Совершенствование гигиенических нормативно-методических документов по обеспечению лазерной безопасности. *Материалы 17-го Российского Национального Конгресса с международным участием «ПРО-ФЕССИЯ и ЗДОРОВЬЕ»* (г. Нижний Новгород, 26–29 сентября 2023 года). <https://doi.org/10.31089/978-5-6042929-1-4-2023-1-344-347>

References

- Haas J. and Mizaikoff B. Advances in mid-infrared spectroscopy for chemical analysis. *Annual Review of Analytical Chemistry*. 2016; 9: 45–68.
- Tittel F.K. Mid-infrared Laser Based Gas Sensor Technologies for Environmental Monitoring, Medical Diagnostics, Industrial and Security Applications. In: *Terahertz and Mid Infrared Radiation: Detection of Explosives and CBRN (Using Terahertz)*. 2014: 153–165. <https://clck.ru/39Wa3V>
- Henderson B. et al. Laser spectroscopy for breath analysis: towards clinical implementation. *Applied physics B*. 2018; 124: 1–21.
- Pleitez M.A. et al. Label-free metabolic imaging by mid-infrared optoacoustic microscopy in living cells. *Nature biotechnology*. 2019; 38: 293–296.
- Amini-Nik S. et al. Ultrafast Mid-IR laser scalpel: Protein signals of the fundamental limits to minimally invasive surgery. *PLoS ONE*. 2010; 5: e13053.
- Hecht J. Photonic Frontiers: Laser countermeasures: scaling down mid-IR laser countermeasures for smaller aircraft. *Laser focus world*. 2014. <https://clck.ru/39WZzb>
- Paltsev Yu.P., Zheltov G.I., Komarova A.A. Biological effects and criteria for assessing the danger of laser radiation. *Vestnik akademii meditsinskikh nauk*. 1992: 7–21 (in Russian).
- Pal'tsev Yu.P. Effects of exposure to laser radiation. In: *Influence of hazardous and harmful production factors on the human body. Medico-biological and metrological aspects [Vozdeystviye na organizm cheloveka opasnykh i vrednykh proizvodstvennykh faktorov. Mediko-biologicheskiye i metrologicheskiye aspekty. Spravochnik v 2-kh tomakh]*. Moscow; 2004: 170–189 (in Russian).
- Andrikopoulos A., Thanopoulos I. Biological effects of laser irradiation and occupational safety. *Electromagnetic Radiation: History, Theory and Research*. 2018: 135–156.
- Thanos S., Böhm M., Meyer zu Hörste M., Schmidt P.F. Retinal damage induced by mirror-reflected light from a laser pointer. *BMJ Case Rep*. 2015: bcr2015210311. <https://doi.org/10.1136/bcr-2015-210311>
- Preobrazhensky P.V., Shostak V.I., Balashevich L.I. *Light eye damage*. L.: Meditsina; 1986 (in Russian).
- Kibovsky V.T., Kukhtevich V.I., Novitsky L.A., Assessment of the degree of danger of directed laser beams for human eyes. *Kvantovaya elektronika*. 1980; 7(12): 2523–2529 (in Russian).
- Podoltsev A.S., Zheltov G.I. The effect of infrared radiation on the cornea. *Kvantovaya elektronika*. 1989; 16(10): 2136–2140 (in Russian).
- Podoltsev A.S., Zheltov G.I. Mathematical modeling of maximum permissible levels of laser infrared irradiation of the cornea. *Gigiena truda i professional'nye zabolevaniya*. 1992; 6: 42–43 (in Russian).
- Zheltov G.I., Glazkov V.N., Kirkovsky A.I., Podol'tsev A.S. Mathematical Models of Laser-Tissue Interactions for Treatment and Diagnosis in Ophthalmology. In: *Laser Application in Life Sciences, Part two: Lasers in Biophysics and Biomedicine, Pros. SPIE*. 1990; 1403: 752–753.
- Zheltov G.I. The laser Safety Norms of the Former Soviet Union. *Proceedings of the International Laser Safety Conference ILSC 97, Orlando, Laser Institute of America*. 1997; 3: 189–198.
- Podol'tsev A.S., Zheltov G.I., Privalov A.P., Chechin P.P. Macrokinetics of thermal denaturation during infrared laser irradiation of the cornea. In: *V Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer*. Minsk. 2004; 2: 157–158 (in Russian).
- Alekperov S.I., Karpovich V.V., Koltsov A.A., Kuznetsova N.Yu., Novikov S.A., Kugleev A.A. Part III. Experimental assessment of the effects of mid-infrared laser radiation on the eye. *Oftal'mologicheskie vedomosti*. 2011; IV(4): 4–15 (in Russian).
- Hale G.M., Querry M.R. Optical Constants of Water in the Band from 0.2 μm to 200 μm . *Appl. Opt.* 1973; 12(3): 552–563.
- Van den Berg T.J., Spekreijse H. Near Infrared Light Absorption in the Human Eye Media. *Vision Res*. 1997; 37(2): 249–253.
- Sliney D., Wolbarsht M. Safety with Lasers and Other Optical Sources. A *Comprehensive Handbook*, Plenum Press. 1982. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4899-3596-0>
- Tuchin V.V., Shubochkin L.P. Application of lasers in ophthalmology. Part 1. Interaction of optical radiation with eye tissues. *Obzory po ehlektronnoy tekhnike, Ser. 11. Lazernaya tekhnika i optoelektronika*. M.: Central Research Institute of Electronics. Issue 2(1037), 1982–51 (in Russian).
- ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1,000 μm . *Health Phys*. 2013; 105(3): 271–295.
- 21 CFR § 1040.10 – Laser products. <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/21/1040.10> (Access 27.02.2024).
- Pokhodzey L.V., Paltsev Yu.P. Current status of hygienic regulation of laser radiation in the Russian Federation and abroad (literature review). *Gigiena i sanitariya*. 2022; 101(12): 1464–1468. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-12-1464-1468> (in Russian).
- Paltsev Yu.P., Pokhodzey L.V. Hygienic normative-methodological documents improvement for laser safety ensuring (17th Russian National Congress with international participation "Occupation and Health" (Nizhny Novgorod, September 26–29, 2023). <https://doi.org/10.31089/978-5-6042929-1-4-2023-1-344-347> (in Russian).

Информация об авторах:

Пальцев Юрий Петрович

главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова, Заслуженный деятель науки РФ, д-р мед. наук, профессор.
E-mail: paltsev31@mail.ru

Походзей Лариса Васильевна

ведущий научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, д-р мед. наук, профессор.
E-mail: Lapokhodzey@yandex.ru

Желтов Георгий Иванович

главный научный сотрудник, ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова» НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук.
E-mail: baumolga@gmail.com

Information about the authors:

Yuriy P. Paltsev

Chief Researcher, Laboratory of Electromagnetic Fields, Izmerov Research Institute of Occupational Health, Honored Scientist of the Russian Federation, Dr. Sci. (Med.), Professor.

E-mail: paltsev31@mail.ru<https://orcid.org/0000-0002-3999-0457>

Larisa V. Pokhodzey

Leading Researcher at the Laboratory of Electromagnetic Fields, Dr. Sci. (Med.), Professor.

E-mail: Lapokhodzey@yandex.ru<https://orcid.org/0000-0003-3561-1605>

Georgy I. Zheltov

Chief Researcher, B.I. Stepanov Institute of Physics, Dr. Sci. (Phys.-Math.).

E-mail: baumolga@gmail.com