



Влияние лазерного излучения видимой области спектра на функциональное состояние зрительного анализатора

Н.Ю. Малькова^{1,2}, М.Д. Петрова¹

¹ ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора,
2-я Советская ул., д. 4, г. Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава
России, Кирочная ул., д. 41, г. Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация

Резюме

Введение. Несмотря на то что с каждым днем появляется все больше информации о влиянии света на зрительный анализатор, данных о действии лазерного излучения видимой области спектра на орган зрения недостаточно. Лазерное излучение в видимой области спектра способно проникать в глаз и достигать сетчатки, что может приводить к повреждениям. Вопрос оценки влияния лазерного излучения на зрительный анализатор приобрел большое значение в связи с ростом числа мероприятий, проведение которых сопровождается лазерным шоу и зафиксированными жалобами посетителей на изменения в органе зрения после посещения подобных мероприятий.

Цель исследования: оценка изменения функционального состояния органа зрения по состоянию цветовой и световой чувствительности при воздействии лазерного излучения.

Материалы и методы. Рассеянное излучение полупроводникового лазера красной, зеленой, синей области спектра с длиной волны 0,63, 0,53, 0,44 мкм соответственно, энергетической освещенности 1×10^{-4} и 1×10^{-5} Вт/см² направлялось в глаза здоровых добровольцев (от 20 до 40 лет (2 группы по 96 человек). Исследование функционального состояния зрительного анализатора проводилось с использованием методик аномалоскопии, адаптометрии в 2022–2023 гг.

Результаты. Изучаемые показатели функционального состояния зрительного анализатора имеют достоверные отклонения от исходных значений после воздействия лазерным излучением энергетической освещенностью 1×10^{-5} Вт/см² (группа 1) и 1×10^{-4} Вт/см² (группа 2) на всех длинах волн, за исключением испытуемых из группы I (440 нм), которые имеют достоверные отклонения только по зеленому и синему цвету. Также можно отметить, что чувствительность к синему цвету в среднем снижается сильнее всего вне зависимости от длины волны источника, в то время как сам синий свет лазера оказывает наименьшее влияние на световую и цветовую чувствительность глаза.

Заключение. С учетом зафиксированных изменений необходимы дальнейшие исследования для полного понимания механизмов воздействия различных спектральных диапазонов лазерного излучения на орган зрения и разработки эффективных мер защиты от потенциального вреда.

Ключевые слова: лазерное излучение видимой области спектра, цветочувствительность, светочувствительность, зрительный анализатор.

Для цитирования: Малькова Н.Ю., Петрова М.Д. Влияние лазерного излучения видимой области спектра на функциональное состояние зрительного анализатора // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 5. С. 55–60. doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-5-55-60

Effects of Visible Laser Radiation on the Functional State of the Eye

Natalia Yu. Mal'kova,^{1,2} Milena D. Petrova¹

¹ North-West Public Health Research Center, 4, 2nd Sovetskaya Street, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation

² North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov,
41 Kirochnaya Street, Saint Petersburg, 191015, Russian Federation

Summary

Background: Despite the growing body of knowledge about ocular effects of light, data on the impact of visible laser radiation on the organ of vision is insufficient. This radiation can penetrate the eye, reach the retina, and cause damage. The issue of assessing eye effects of laser radiation has become very important due to the growing number of events accompanied by laser shows and registered complaints of their attendees.

Objective: To evaluate changes in the functional state of the eye following laser radiation exposure using light sensitivity and color vision tests.

Material and methods: Scattered radiation from a semiconductor laser in the red, green, and blue spectral regions with a wavelength of 0.63, 0.53, and 0.44 microns, respectively, with illumination power of 1×10^{-4} W/cm² and 1×10^{-5} W/cm², was directed to the eyes of healthy volunteers aged 20 to 40 years divided into two groups of 96 people each. The functional state of the eyes was established using the anomaloscope and dark adaptometry tests in 2022–2023.

Results: The results of testing were significantly different from the initial values following the exposure to laser radiation with illumination power of 1×10^{-5} W/cm² (group 1) and 1×10^{-4} W/cm² (group 2) at all wavelengths, with the exception of subjects from group 1 (440 nm), who had significant deviations only in terms of green and blue colors. It is worth noting that blue light sensitivity decreases the most, regardless of the wavelength of the source, while the blue laser light itself has the least effect on the light sensitivity and color vision.

Conclusion: Given the changes observed, further research is needed to fully understand the mechanisms of effect of various spectral ranges of laser radiation on the organ of vision and to develop effective protective measures against the potential harm.

Keywords: visible laser radiation, color vision, light sensitivity, eye.

Cite as: Mal'kova NYu, Petrova MD. Effects of visible laser radiation on the functional state of the eye. Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya. 2025;33(5):55–60. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-5-55-60

Введение. Орган зрения, являясь сложной оптической системой, подвержен влиянию различных спектральных диапазонов света. Цветовое восприятие играет ключевую роль в ориентировании человека в окружающей среде. В основе этого процесса лежит палочково-колбочковый аппарат сетчатки, состоящий из двух типов фоторецепторов: палочек, отвечающих за сумеречное зрение, и колбочек, обеспечивающих цветовое зрение [1].

Красный, синий и зеленый свет, составляющие основу цветового восприятия, оказывают неодинаковое воздействие на колбочковый аппарат сетчатки. Это связано с различиями в длине волны, энергии фотонов и механизма взаимодействия со структурами глаза. Колбочки представлены тремя типами, каждый из которых максимально чувствителен к определенному диапазону длин волн, приблизительно соответствующему красному, зеленому и синему цветам [2]. За восприятие синего света ($\approx 450\text{--}495$ нм) отвечают S-колбочки с пиком поглощения в коротковолновой области спектра. Особенно важным является влияние синего света высокой энергии, который, как показали исследования [3], может оказывать негативное воздействие на сетчатку [4]. M-колбочки (чувствительные к зеленому свету $\approx 495\text{--}570$ нм) имеют максимум поглощения в средневолновой области спектра. Зеленый свет считается наиболее «комфортным» для глаз, так как его спектр находится в середине видимого диапазона и хорошо воспринимается большинством людей. За восприятие красного света отвечают L-колбочки, чей пик поглощения располагается в длинноволновой области спектра: $\approx 620\text{--}750$ нм. Красный свет обладает большей проникающей способностью через ткани глаза, что в некоторых случаях может оказывать влияние на более глубокие слои сетчатки. Необходимо учитывать тот факт, что длинноволновые и средневолновые колбочки, имеющие пики чувствительности в желто-красном и сине-зеленом диапазонах соответственно, обладают широкими зонами спектральной чувствительности с существенным перекрытием. Это означает, что колбочки определенного типа реагируют не исключительно на свой собственный цвет, а демонстрируют повышенную чувствительность к нему по сравнению с другими цветами [5].

Различное поглощение света разными типами колбочек определяет не только цветовое восприятие, но и оказывает специфическое влияние на метаболизм и функционирование этих клеток. Палочки, отвечающие за ночное зрение, также могут подвергаться воздействию различных спектральных диапазонов. Исследования показывают, что красный свет может оказывать положительное воздействие на регенерацию палочково-колбочкового аппарата и улучшение зрительной функции в определенных условиях, например при фотобиомодуляции для уменьшения повреждений при дегенеративных заболеваниях сетчатки [6–9]. Зеленый свет считается наименее утомительным для глаз, предположительно, благодаря оптимальному диапазону длин волн и сбалансированному воздействию на разные типы колбочек. Однако исследований,

посвященных специфическому влиянию зеленого света на палочково-колбочковый аппарат, относительно немного. Синий свет, особенно HEV-диапазон (высокоэнергетический свет видимого спектра в диапазоне от 400 до 500 нм), является предметом активных исследований из-за его потенциального вреда для сетчатки. Эксперименты *in vitro* и *in vivo* продемонстрировали, что воздействие синего света может приводить к фотохимическому повреждению фоторецепторных клеток, окислительному стрессу и активации апоптоза [10]. Это связывают с образованием активных форм кислорода под действием синего света.

Несмотря на то что с каждым днем появляется все больше информации о влиянии света на зрительный анализатор, данных о действии лазерного излучения видимой области спектра на орган зрения недостаточно. Лазерное излучение в видимой области спектра способно проникать в глаз и достигать сетчатки, что может приводить к различным повреждениям в зависимости от длины волны, мощности и длительности воздействия. Сетчатка особенно уязвима к повреждениям из-за концентрации световой энергии на небольшом участке. Известно, что коротковолновое лазерное излучение, обладая высокой энергией, может вызывать каскад фотохимических реакций в фоторецепторах сетчатки, приводя к изменению восприятия цвета, а в тяжелых случаях – к повреждению зрительного анализатора [11–14]. Неспецифическое действие связано с термическим повреждением.

Вопрос оценки влияния лазерного излучения на зрительный анализатор приобрел большое значение в связи с ростом числа мероприятий, проведение которых сопровождается лазерным шоу и зафиксированными жалобами посетителей на изменения в органе зрения после посещения подобных мероприятий [15–18].

Цель исследования – оценка изменения функционального состояния органа зрения по состоянию цветовой и световой чувствительности при воздействии лазерного излучения.

Материалы и методы. Исследования проведены в 2022–2023 гг. на базе ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья». В исследовании приняли участие 192 добровольца мужского пола возрастом от 20 до 40 лет (2 группы по 96 человек). Каждый доброволец был осмотрен врачом-офтальмологом. К исследованию допускались добровольцы без патологий органа зрения и с эмметропической рефракцией. Все испытуемые до начала эксперимента были предупреждены о необходимости полноценного отдыха для избежания умственных и физических перенапряжений и корректности результатов. Исследование проводилось с целью изучения влияния рассеянного излучения полупроводникового лазера с длиной волны 630, 530, 440 нм на функциональное состояние органа зрения. Энергетическая освещенность лазерного излучения составляла 1×10^{-4} и 1×10^{-5} Вт/см², время воздействия – 5 секунд.

Для исследования использовались специальные офтальмологические методы: аномалоскопия

и адаптометрия. В рамках аномалоскопии на аномалоскопе АН-59 оценивался порог цветоразличения, определяемый как наименьшее цветовое различие, воспринимаемое человеческим глазом при максимальной яркости левого тестового полуполя посредством сопоставления его цвета с вариативным цветом правого полуполя. Функциональное состояние палочкового аппарата зрения анализировалось с помощью адаптометрии, измеряя временной порог световой чувствительности по трехминутной методике в соответствии с инструкцией по эксплуатации адаптометра АДМ. Пороговым значением являлось время, прошедшее от завершения световой адаптации до момента обнаружения объекта заданной яркости. Время темновой адаптации определялось после двухминутной световой адаптации при яркости внутренней поверхности стенок шара адаптометра 795 кд/м², яркости испытательного объекта 0,0056 кд/м².

Исследование проводилось в два этапа: до воздействия лазерного излучения и сразу после него. Добровольцы распределялись на 2 группы по уровню лазерного излучения и на 3 подгруппы внутри каждой из групп – по длины волн. Статистический анализ полученных результатов проводился с использованием программы Statistica 8. Нормальность распределения оценивалась проводилась в соответствии с критерием Шапиро – Уилка.

Результаты. На основе пилотного исследования была разработана модель проведения эксперимента^{1,2}. На основании данных гигиенических исследований энергетической освещенности были выбраны два уровня: максимальный зафиксированный, но не превышающий ПДУ (1×10^{-4} Вт/см²) для группы 2, и уровень в десять раз ниже для группы 1. Для проведения эксперимента были выбраны длины волн, наиболее часто встречающиеся при проведении культурно-массовых мероприятий: 630, 530 и 440 нм. Внутри каждой группы добровольцы были поделены на подгруппы в зависимости от длины волны – по 32 человека. Результаты исследований функционального состояния органа зрения

у здоровых добровольцев по состоянию световой и цветовой чувствительности представлены в таблице.

Как видно из таблицы, изучаемые показатели функционального состояния зрительного анализатора имеют достоверные отклонения от исходных значений после воздействия лазерным излучением энергетической освещенностью 1×10^{-4} и 1×10^{-5} Вт/см² на всех длинах волн за исключением испытуемых из группы 1 (440 нм), которые имеют достоверные отклонения только по зеленому и синему цвету. При этом показатели чувствительности к зеленому свету при воздействии излучения с длинами волн 530 и 440 нм показали наименьшее колебание в зависимости от уровня энергетической освещенности – 33,63 и 33,53 % для 530 нм и 8,48 и 8,19 % для 440 нм.

Также можно отметить, что чувствительность к синему свету в среднем снижается сильнее всего вне зависимости от длины волны источника, в то время как сам синий свет лазера оказывает наименьшее влияние на световую и цветовую чувствительность глаза.

Обсуждение. Лазерное излучение синей области спектра меньше всего влияет на цветоразличение, но при этом чувствительность к синему цвету ухудшается сильнее всего вне зависимости от действующей длины волны. Снижения чувствительности к синему цвету может объясняться тем, что в сетчатке человека колбочки, чувствительные к синему свету (S-колбочки, 420–440 нм), составляют всего около 5–10 % от общего количества колбочек, в то время как M-(зеленый) и L-(красный) колбочки более многочисленны. Поскольку их количество значительно уступает, любые повреждения или нарушения приводят к более заметному снижению чувствительности к синему цвету. Также синее излучение сильнее рассеивается в оптических средах глаза (роговица, хрусталик, стекловидное тело). В центральной ямке сетчатки (макула) синие колбочки концентрируются в кольцевом пространстве и отсутствуют в самом центре ямки (фовеола), где присутствуют только зеленые и красные колбочки

Таблица. Средние величины порогов цветоразличения, световой чувствительности у представителей обследуемых групп ($M \pm m$)

Table. Mean values of the thresholds of color sensitivity and light sensitivity in the study groups ($M \pm m$)

Группа / Group	Светочувствительность, с / Light sensitivity, s	Цветочувствительность (усл. е.) / Color sensitivity (e.u.)		
		красный / red	зеленый / green	синий / blue
Исходные значения / Initial values	$21,91 \pm 0,47$	$12,28 \pm 0,26$	$9,91 \pm 0,23$	$8,97 \pm 0,29$
Группа 1 (630 нм) / Group 1 (630 nm)	$33,16 \pm 0,35$	$14,09 \pm 0,27$	$11,22 \pm 0,25$	$11,06 \pm 0,21$
Группа 2 (630 нм) / Group 2 (630 nm)	$34,97 \pm 0,29$	$14,81 \pm 0,27$	$11,69 \pm 0,21$	$11,16 \pm 0,16$
Группа 1 (530 нм) / Group 1 (530 nm)	$36,84 \pm 0,36$	$14,50 \pm 0,30$	$13,81 \pm 0,26$	$12,44 \pm 0,28$
Группа 2 (530 нм) / Group 2 (530 nm)	$39,13 \pm 0,34$	$15,28 \pm 0,27$	$13,84 \pm 0,30$	$13,41 \pm 0,22$
Группа 1 (440 нм) / Group 1 (440 nm)	$29,88 \pm 0,29$	$12,75 \pm 0,31$	$11,22 \pm 0,22$	$10,56 \pm 0,30$
Группа 2 (440 нм) / Group 2 (440 nm)	$30,94 \pm 0,32$	$14,00 \pm 0,35$	$11,22 \pm 0,25$	$11,03 \pm 0,24$

Примечание: жирным шрифтом обозначены достоверные изменения с исходным состоянием.

Note: statistically significant differences are in bold.

¹ Малькова Н.Ю., Романенко Е.И., Спиридонов П.Ю. Влияние лазерного излучения проекторов на функциональное состояние зрительного анализатора подростков // Профилактическая и клиническая медицина. 2014. Т. 3. № 52. С. 82–85.

² Малькова Н.Ю., Ушкова И.Н., Романенко Е.И. Влияние лазерного излучения от проекторов на орган зрения // Медицина труда и промышленная экология. 2014. № 9. С. 37–40.

[19]. Этим может объясняться более слабое влияние синего света на функциональное состояние палочко-колбочкового аппарата. Исследования, проведенные группой ученых на мышах – моделях для изучения роли ганглиозных клеток в регуляции зрачка при воздействии различных световых стимулов, выявили значительную дифференциацию реакции зрачка на синий (480 нм) и красный свет [20]. При этом у людей, в том числе и подростков [21], при синем освещении наблюдается не только более сильное, но и более длительное сужение зрачка по сравнению с реакцией на красный свет [22]. По данным некоторых исследователей, наличие аномалий рефракции влияет на реакцию зрачка только на синий свет. В частности, у лиц с миопией наблюдается менее выраженное сужение зрачка по сравнению с эмметропами [23]. Это также может быть причиной различий в восприятии цветов у людей.

При определении ПДУ [24, 25] лазерного излучения для населения при проведении массовых культурных мероприятий принято ориентироваться на время мигательного рефлекса – 0,25 с³. При расчете допустимых значений в соответствии с СанПиН 1.2.3685–21⁴ для длин волн от 380 до 600 используется одна формула. Это справедливо для повреждающего действия лазерного излучения, однако полученные данные указывают на то, что при низких интенсивностях есть значительные различия во влиянии излучения разных длин волн внутри этого диапазона.

Заключение. Красный, синий и зеленый свет оказывают различное влияние на палочково-колбочковый аппарат сетчатки, что вероятно обусловлено особенностями их поглощения и специфическим воздействием на фоторецепторные клетки. Хотя красный свет может иметь регенеративные свойства, а зеленый считается наиболее комфортным для зрения, синий свет, особенно НЕВ-диапазон, представляет потенциальную опасность для сетчатки из-за его способности вызывать фотохимические повреждения и окислительный стресс. С учетом зафиксированных изменений необходимы дальнейшие исследования для полного понимания механизмов воздействия различных спектральных диапазонов лазерного излучения на орган зрения и разработки эффективных мер защиты от потенциального вреда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Некрасова М.А., Ротов А.Ю., Николаева Д.А., Астахова Л.А. Феномен адаптационной памяти и неизвестные механизмы адаптации фоторецепторов сетчатки // Тезисы участников конференции (29–30 сентября 2022 г.) «Обработка и интеграция информации в сенсорных системах: от внешнего сигнала к сложному образу». Общество с ограниченной ответственностью «Квант Медиа», 2022. № 1. С. 80–83.
- Hadyniak SE, Hagen JFD, Eldred KC, et al. Retinoic acid signalling regulates spatiotemporal specification of human green and red cones. *PLoS Biol.* 2024;22(1):e3002464. doi: 10.1371/journal.pbio.3002464
- Wang L, Yu X, Zhang D, et al. Long-term blue light exposure impairs mitochondrial dynamics in the retina in light-induced retinal degeneration in vivo and in vitro. *J Photochem Photobiol B.* 2023;240:112654. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2023.112654
- Cougnard-Gregoire A, Merle BMJ, Aslam T, et al. Blue light exposure: Ocular hazards and prevention – A narrative review. *Ophthalmol Ther.* 2023;12(2):755–788. doi: 10.1007/s40123-023-00675-3
- Чупров А.Д., Синькова В.И., Кузнецов И.В. Теории цветовосприятия. Фоторецепторный аппарат сетчатки глаза // Современные проблемы науки и образования. 2021. № 6. С. 189. doi: 10.17513/spno.31287. EDN HVSKVX.
- Zhu Q, Cao X, Zhang Y, et al. Repeated low-level red-light therapy for controlling onset and progression of myopia – A review. *Int J Med Sci.* 2023;20(10):1363–1376. doi: 10.7150/ijms.85746
- Huang Z, He T, Zhang J, Du C. Red light irradiation as an intervention for myopia. *Indian J Ophthalmol.* 2022;70(9):3198–3201. doi: 10.4103/ijo.IJO_15_22
- Liu Z, Sun Z, Du B, et al. The effects of repeated low-level red-light therapy on the structure and vasculature of the choroid and retina in children with premyopia. *Ophthalmol Ther.* 2024;13(3):739–759. doi: 10.1007/s40123-023-00875-x
- Ahn SH, Suh JS, Lim GH, Kim TJ. The potential effects of light irradiance in glaucoma and photobiomodulation therapy. *Bioengineering (Basel).* 2023;10(2):223. doi: 10.3390/bioengineering10020223
- Zinflou C, Rochette PJ. Indenopyrene and blue-light co-exposure impairs the tightly controlled activation of xenobiotic metabolism in retinal pigment epithelial cells: A mechanism for synergistic toxicity. *Int J Mol Sci.* 2023;24(24):17385. doi: 10.3390/ijms242417385
- Gregori NZ, Cai L, Moshiri Y. Self-inflicted laser-induced retinopathy. *Diagnostics (Basel).* 2024;14(4):361. doi: 10.3390/diagnostics14040361
- Chen X, Dajani OAW, Alibhai AY, Duker JS, Baumal CR. Long-term visual recovery in bilateral handheld laser pointer-induced maculopathy. *Retin Cases Brief Rep.* 2021;15(5):536–539. doi: 10.1097/ICB.00000000000000845
- Faraj S, Bathen ME, Galeckas A, et al. Retinal injuries in seven teenage boys from the same handheld laser. *Am J Ophthalmol Case Rep.* 2022;27:101596. doi: 10.1016/j.ajoc.2022.101596
- Tran K, Wang D, Scharf J, Sadda S, Sarraf D. Inner choroidal ischaemia and CNV due to handheld laser-induced maculopathy: A case report and review. *Eye (Lond).* 2020;34(11):1958–1965. doi: 10.1038/s41433-020-0830-3
- Patil G, Wadgaonkar S, Bhat K, Sonawane SJ. The dangers of recreational lasers: A case series of retinal injuries. *J Clin Ophthalmol Res.* 2025;13(1):114–118. doi: 10.4103/jcor.jcor_143_24
- Wong EW, Lai AC, Lam RF, Lai FH. Laser-induced ocular injury: A narrative review. *Hong Kong J Ophthalmol.* 2020;24(2):51–59. doi: 10.12809/hkjo-v24n2-278
- Bharucha K, Parmar V, Sonawane A, Vora U, Kulkarni S, Deshpande M. Laser induced retinal injury sustained in a recreational laser show. *Indian J Clin Exp Ophthalmol.* 2021;7(1):250–252. doi: 10.18231/j.ijceo.2021.051
- Menz HB. A retrospective analysis of JAPMA publication patterns, 1991–2000. *J Am Podiatr Med Assoc.* 2002;92(5):308–313. doi: 10.7547/87507315-92-5-308

¹ МР 2.2.4.0115–16 «Оценка безопасности использования лазерных проекторов». М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2017. 12 с.

² СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 668 с.

19. Грачев В.И., Колесов В.В., Меньшикова Г.Я., Рябенков В.И. Физиологические аспекты восприятия визуальной информации глазодвигательным аппаратом // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2021. Т. 13. № 3. С. 389–402. doi: 10.17725/renci.2021.13.389. EDN ORECIQ.
20. Cleymaet AM, Berezin CT, Vigh J. Endogenous opioid signaling in the mouse retina modulates pupillary light reflex. *Int J Mol Sci.* 2021;22(2):554. doi: 10.3390/ijms22020554
21. Reidy MG, Hartwick ATE, Mutti DO. The association between pupillary responses and axial length in children differs as a function of season. *Sci Rep.* 2024;14(1):598. doi: 10.1038/s41598-024-51199-0
22. Hartstein LE, LeBourgeois MK, Durniak MT, Najjar RP. Differences in the pupillary responses to evening light between children and adolescents. *J Physiol Anthropol.* 2024;43(1):16. doi: 10.1186/s40101-024-00363-6
23. Mutti DO, Mulvihill SP, Orr DJ, Shorter PD, Hartwick ATE. The effect of refractive error on melanopsin-driven pupillary responses. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2020;61(12):22. doi: 10.1167/iovs.61.12.22
24. Ritt G. Laser safety – What is the laser hazard distance for an electro-optical imaging system? *Sensors (Basel).* 2023;23(16):7033. doi: 10.3390/s23167033
25. Mlynaczak J, Kopczynski K, Kaliszewski M, Włodarski M. Estimation of nominal ocular hazard distance and nominal ocular dazzle distance for multibeam laser radiation. *Appl Opt.* 2021;60(22):6414–6421. doi: 10.1364/AO.431490

REFERENCES

1. Nekrasova MA, Rotov AYU, Nikolaeva DA, Astakhova LA. Adaptation memory phenomenon and unknown mechanisms of adaptation of retinal photoreceptors. In: *Information Processing and Integration in Sensory Systems: From External Signal to Complex Image: Proceedings of the Scientific Conference Dedicated to 90 Years Since the Birth of Academician I.A. Shevelev, Moscow, September 29–30, 2022.* Moscow: Quantum Media LLC Publ.; 2022:80–83. (In Russ.)
2. Hadyniak SE, Hagen JFD, Eldred KC, et al. Retinoic acid signaling regulates spatiotemporal specification of human green and red cones. *PLoS Biol.* 2024;22(1):e3002464. doi: 10.1371/journal.pbio.3002464
3. Wang L, Yu X, Zhang D, et al. Long-term blue light exposure impairs mitochondrial dynamics in the retina in light-induced retinal degeneration in vivo and in vitro. *J Photochem Photobiol B.* 2023;240:112654. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2023.112654
4. Coughnard-Gregoire A, Merle BMJ, Aslam T, et al. Blue light exposure: Ocular hazards and prevention – A narrative review. *Ophthalmol Ther.* 2023;12(2):755–788. doi: 10.1007/s40123-023-00675-3
5. Chuprov AD, Sinkova VI, Kuznetsov IV. Color perception theories. Photoreceptors structure of eye retina. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya.* 2021;(6):189. (In Russ.) doi: 10.17513/spno.31287
6. Zhu Q, Cao X, Zhang Y, et al. Repeated low-level red-light therapy for controlling onset and progression of myopia – A review. *Int J Med Sci.* 2023;20(10):1363–1376. doi: 10.7150/ijms.85746
7. Huang Z, He T, Zhang J, Du C. Red light irradiation as an intervention for myopia. *Indian J Ophthalmol.* 2022;70(9):3198–3201. doi: 10.4103/ijo.IJO_15_22
8. Liu Z, Sun Z, Du B, et al. The effects of repeated low-level red-light therapy on the structure and vasculature of the choroid and retina in children with premyopia. *Ophthalmol Ther.* 2024;13(3):739–759. doi: 10.1007/s40123-023-00875-x
9. Ahn SH, Suh JS, Lim GH, Kim TJ. The potential effects of light irradiance in glaucoma and photobiomodulation therapy. *Bioengineering (Basel).* 2023;10(2):223. doi: 10.3390/bioengineering10020223
10. Zinflou C, Rochette PJ. Indenopyrene and blue-light co-exposure impairs the tightly controlled activation of xenobiotic metabolism in retinal pigment epithelial cells: A mechanism for synergistic toxicity. *Int J Mol Sci.* 2023;24(24):17385. doi: 10.3390/ijms242417385
11. Gregori NZ, Cai L, Moshiri Y. Self-inflicted laser-induced retinopathy. *Diagnostics (Basel).* 2024;14(4):361. doi: 10.3390/diagnostics14040361
12. Chen X, Dajani OAW, Alibhai AY, Duker JS, Baumal CR. Long-term visual recovery in bilateral handheld laser pointer-induced maculopathy. *Retin Cases Brief Rep.* 2021;15(5):536–539. doi: 10.1097/ICB.0000000000000845
13. Faraj S, Bathen ME, Galeckas A, et al. Retinal injuries in seven teenage boys from the same handheld laser. *Am J Ophthalmol Case Rep.* 2022;27:101596. doi: 10.1016/j.ajoc.2022.101596
14. Tran K, Wang D, Scharf J, Sadda S, Sarraf D. Inner choroidal ischaemia and CNV due to handheld laser-induced maculopathy: A case report and review. *Eye (Lond).* 2020;34(11):1958–1965. doi: 10.1038/s41433-020-0830-3
15. Patil G, Wadgaonkar S, Bhat K, Sonawane SJ. The dangers of recreational lasers: A case series of retinal injuries. *J Clin Ophthalmol Res.* 2025;13(1):114–118. doi: 10.4103/jcor.jcor_143_24
16. Wong EW, Lai AC, Lam RF, Lai FH. Laser-induced ocular injury: A narrative review. *Hong Kong J Ophthalmol.* 2020;24(2):51–59. doi: 10.12809/hkjo-v24n2-278
17. Bharucha K, Parmar V, Sonawane A, Vora U, Kulkarin S, Deshpande M. Laser induced retinal injury sustained in a recreational laser show. *Indian J Clin Exp Ophthalmol.* 2021;7(1):250–252. doi: 10.18231/j.ijceo.2021.051
18. Menz HB. A retrospective analysis of JAPMA publication patterns, 1991–2000. *J Am Podiatr Med Assoc.* 2002;92(5):308–313. doi: 10.7547/87507315-92-5-308
19. Grachev VI, Kolesov VV, Menshikova GYa, Ryabenkov VI. Physiological aspects of visual information perception of the oculomotor apparatus. *Radioelektronika. Nansistemy. Informatsionnye Tekhnologii.* 2021;13(3):389–402. (In Russ.) doi: 10.17725/renci.2021.13.389
20. Cleymaet AM, Berezin CT, Vigh J. Endogenous opioid signaling in the mouse retina modulates pupillary light reflex. *Int J Mol Sci.* 2021;22(2):554. doi: 10.3390/ijms22020554
21. Reidy MG, Hartwick ATE, Mutti DO. The association between pupillary responses and axial length in children differs as a function of season. *Sci Rep.* 2024;14(1):598. doi: 10.1038/s41598-024-51199-0
22. Hartstein LE, LeBourgeois MK, Durniak MT, Najjar RP. Differences in the pupillary responses to evening light between children and adolescents. *J Physiol Anthropol.* 2024;43(1):16. doi: 10.1186/s40101-024-00363-6
23. Mutti DO, Mulvihill SP, Orr DJ, Shorter PD, Hartwick ATE. The effect of refractive error on melanopsin-driven pupillary responses. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2020;61(12):22. doi: 10.1167/iovs.61.12.22
24. Ritt G. Laser safety – What is the laser hazard distance for an electro-optical imaging system? *Sensors (Basel).* 2023;23(16):7033. doi: 10.3390/s23167033
25. Mlynaczak J, Kopczynski K, Kaliszewski M, Włodarski M. Estimation of nominal ocular hazard distance and nominal ocular dazzle distance for multibeam laser radiation. *Appl Opt.* 2021;60(22):6414–6421. doi: 10.1364/AO.431490

Сведения об авторах:

✉ **Малькова** Наталия Юрьевна – д.б.н., главный научный сотрудник отдела физических факторов ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; профессор кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России; e-mail: lasergrmal@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0426-8851>.

Петрова Милена Дмитриевна – младший научный сотрудник отдела физических факторов ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; e-mail: petrovoi.md@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5506-6523>.

Информация о вкладе авторов: концепция и дизайн исследования: *Малькова Н.Ю.*; обзор литературы: *Петрова М.Д.*; сбор данных, анализ, интерпретация данных, подготовка проекта рукописи: *Малькова Н.Ю., Петрова М.Д.* Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: Исследование одобрено на заседании Локального этического комитета ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора (Протокол № 2022/50.3 от 28.12.2022). Все процедуры, выполненные в исследовании с участием людей, соответствуют этическими стандартами институционального и/или национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 года и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие на участие в исследовании и публикацию результатов.

Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 03.03.25 / Принята к публикации: 10.05.25 / Опубликована: 30.05.25

Author information:

✉ Natalia Yu. Mal'kova, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Department of Physical Factors, North-West Public Health Research Center; Professor, Department for Hygiene of Educational, Training, and Occupational Conditions and Radiation Hygiene, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; e-mail: lasergrmal@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0426-8851>.

Milena D. Petrova, Junior Researcher, Department Department of Physical Factors, North-West Public Health Research Center; e-mail: petrovoi.md@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5506-6523>.

Author contributions: study conception and design: *Mal'kova N.Yu.*; bibliography compilation and referencing: *Petrova M.D.*; data collection, analysis and interpretation of results, draft manuscript preparation: *Mal'kova N.Yu., Petrova M.D.* Both authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Compliance with ethical standards: The study was approved by the Local Ethics Committee of the North-West Public Health Research Center (protocol No. 2022/50.3 of December 28, 2021). All procedures performed in the study involving human participants comply with ethical standards of the institutional and/or National Committee for Research Ethics and the WMA Helsinki Declaration of 1964 and its subsequent amendments or comparable standards of ethics. Informed voluntary consent to participate in the study and publish the results was obtained from each subject

Funding: This research received no external funding.

Conflict of interest: The authors have no conflicts of interest to declare.

Received: March 3, 2025 / Accepted: May 10, 2025 / Published: May 30, 2025