

© Петрова М.Д., Малькова Н.Ю., 2021

УДК 613.7:614.8

Негативное воздействие лазерного излучения видимой области спектра на население. Обзор

М.Д. Петрова¹, Н.Ю. Малькова^{1,2}¹ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 2-я Советская ул., д. 4, г. Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация²ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова» Минздрава России, ул. Кирочная, д. 41, г. Санкт-Петербург, 191015, Российская Федерация

Резюме

Введение. По мере распространения лазерных технологий в различных отраслях человеческой деятельности увеличилось число контактов с лазерным излучением широкого круга пользователей, не знакомых со спецификой воздействия данного фактора на организм человека в том числе и в повседневной жизни, что привело в последние годы к возрастанию количества случаев травматизации населения.

Цель: поиск информации о механизмах биологического действия лазерного излучения видимой области спектра в российских и зарубежных научных литературных источниках и анализ негативных последствий этого воздействия, встречающихся в отечественной и международной практике.

Материалы и методы. Обзор доступных научных иностранных и российских литературных источников. Поиск и отбор источников был осуществлен с использованием открытых текстовых баз данных медицинских и биологических публикаций PubMed и РИНЦ за период с 1969 по 2019 г.

Результаты исследований. Как российские, так и зарубежные исследователи отмечают, что воздействие лазерного излучения на организм человека вызывает специфический и неспецифические ответы на всех уровнях организации тканей. Степень и характер развивающихся морфологических изменений зависят от длины волны излучения, времени воздействия, мощности, энергии и ее плотности на единицу облучаемой поверхности.

Выводы. Полученные данные указывают на то, что портативные лазерные указки и мощные лазерные проекторы могут нанести заметную травму макулы и в отдельных случаях навсегда повредить зрение. Хотя часто отмечалось и хорошее восстановление зрения, общедоступность коммерческих лазерных устройств потенциально опасна, особенно для несовершеннолетних, поэтому следует повысить осведомленность общественности о механизмах воздействия лазерного излучения на человека.

Ключевые слова: лазерное излучение, видимый спектр, биологическое действие.

Для цитирования: Петрова М.Д., Малькова Н.Ю. Негативное воздействие лазерного излучения видимой области спектра на население. Обзор // Здоровье населения и среда обитания. 2021. Т. 29. № 9. С. 44–49. doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-29-9-44-49>

Сведения об авторах:

✉ **Петрова** Милена Дмитриевна – младший научный сотрудник отдела комплексной гигиенической оценки 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>.

Малькова Наталия Юрьевна – д.б.н., главный научный сотрудник отдела комплексной гигиенической оценки 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: <http://orcid.org/0000-0002-0426-8851>.

Информация о вкладе авторов: Петрова М.Д. – обзор публикаций по теме статьи, анализ собранных данных, написание текста рукописи; Малькова Н.Ю. – обзор публикаций по теме статьи, анализ собранных данных, редактирование материала, утверждение окончательного варианта статьи.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья получена: 08.07.21 / Принята к публикации: 20.08.21 / Опубликовано: 30.09.21

Adverse Health Effects of Exposure to Visible Laser Radiation in the General Population: A Review

Milena D. Petrova,¹ Natalia Yu. Mal'kova^{1,2}¹Northwest Public Health Research Center, 4 2nd Sovetskaya Street, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation²North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, 41 Kirochnaya Street, Saint Petersburg, 191015, Russian Federation

Summary

Introduction: With the spread of laser technologies in various spheres of human activity, the number of exposures to laser radiation of a wide range of users unfamiliar with specifics of its health effects, including those in everyday life, has increased, thus resulting in an increased number of traumas in the general population in recent years.

Objectives: To search for data on the biological mechanisms of action of visible laser radiation in Russian and foreign scientific literature and to analyze adverse health effects of this exposure encountered in domestic and international practice.

Methods: We searched for Russian and foreign full-text open access literary sources in Russian Science Citation Index (RSCI) and PubMed databases of biomedical publications for 1969–2019 and selected the most appropriate ones for review.

Results: Both Russian and foreign researchers note that human exposure to laser radiation induces specific and non-specific responses at all tissue levels of organization. The extent and nature of developing morphological changes depend on the radiation wavelength, exposure time, power, energy and its density per unit of the irradiated surface.

Conclusions: Our findings suggest that portable laser pointers and powerful laser projectors may cause retinal damage, traumatic macular holes and, in some cases, loss of vision. Despite frequently registered good visual recovery, general availability of commercial laser devices poses potential danger, especially for minors, and substantiates the need to raise public awareness of laser safety.

Keywords: laser radiation, visible spectrum, biological action.

For citation: Petrova MD, Mal'kova NYu. Adverse health effects of exposure to visible laser radiation in the general population: A review. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2021; 29(9):44–49. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-29-9-44-49>

Author information:

✉ Milena D. Petrova, Junior Researcher, Department of Complex Hygienic Assessment of Physical Factors, Northwest Public Health Research Center; e-mail: petrovoi.md@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5506-6523>.
Natalia Yu. Mal'kova, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Department of Complex Hygienic Assessment of Physical Factors, Northwest Public Health Research Center; Professor of the Department of Hygiene of Educational and Training Conditions, Occupational 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>.

Author contributions: Petrova M.D. and Mal'kova N.Yu. did a literature review, collected, processed and analyzed data, and wrote the manuscript; both authors contributed to the discussion and approved the final version of the manuscript.

Funding information: The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Received: June 8, 2021 / Accepted: August 20, 2021 / Published: September 30, 2021

Введение. Изучение влияния лазерного излучения на живые организмы началось практически сразу же после создания в 1960 г. первого оптического квантового генератора, использующего явление вынужденного излучения – лазера. С момента его изобретения новые вариации передовой технологии появляются практически каждый год.

По мере распространения лазерных технологий в различных отраслях человеческой деятельности увеличилось число контактов с лазерным излучением широкого круга пользователей, не знакомых со спецификой воздействия данного фактора на организм человека, в том числе и в повседневной жизни (использование лазерных принтеров, считывателей штрихкодов, лазерных указок, проекторов и пр.), что привело в последние годы к возрастанию количества случаев травматизации населения.

Цель исследования: обзор и систематизация информации о механизмах биологического действия лазерного излучения видимой области спектра в российских и зарубежных научных литературных источниках и анализ негативных последствий этого воздействия, встречающихся в отечественной и международной практике.

Материалы и методы исследования: поиск доступных научных иностранных и российских литературных источников. Поиск и отбор источников был осуществлен с использованием открытых текстовых баз данных медицинских и биологических публикаций PubMed и РИНЦ за период с 1969 по 2019 г.

Результаты исследования. Уже в первые годы использования лазеров появились работы, указывающие, что энергия излучения вызывает патологические изменения в органах и тканях. Исследователи предполагают наличие как специфического, так и неспецифического действия лазерного излучения [1, 2]. Результаты анализа полученных данных показали, что данный вид излучения даже при низких интенсивностях воздействия стимулирует изменения, реализуемые на всех уровнях организации биосистемы: субклеточном, клеточном, тканевом, органном, организменном [3, 4]. Экспериментальные и клинические исследования свидетельствуют об изменении конформационного состояния и энергетической активности мембран [5], активации ядерного аппарата и изменении митотической активности клеток [6], основных ферментных систем [7], биосинтетических [8] и окислительно-восстановительных процессов [9]. На организменном уровне воздействие излучения сопровождается астеническим, астеновегетативным и астеноневротическим синдромами разной

степени выраженности и в редких случаях при длительном воздействии лазерного излучения может развиваться гипоталамический синдром, характеризующийся перестройкой нервно-гуморальных регуляторных механизмов с клиническими проявлениями поражения центрального и периферического звеньев гипоталамо-гипофизарно-адреналовой, гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной, гипоталамо-гипофизарно-гонадной систем [10]¹.

Принцип взаимодействия лазерного излучения с биологическими объектами заключается в том, что при определенных условиях свет поглощается структурами-мишенями – хромофорами различных биологических сред и последующим процессом является преобразование световой энергии в тепловую².

Механический эффект лазерного воздействия, возникающий в результате нагрева тканевой жидкости и последующего теплового объемного расширения облучаемых тканей, приводящего к повышению давления, вызывает деформацию и разрыв тканей. Возникающая в очаге поражения ударная волна способна распространяться в окружающих тканях с различными скоростями, поэтому ее эффект может отмечаться даже на значительном расстоянии от места непосредственного облучения. Распространяясь в тканях с ультразвуковой скоростью, ударная волна может вызывать явление кавитации, т. е. образования полости за счет быстрого испарения частиц вещества. Образующиеся полости, спадаясь после прохождения ударной волны, в свою очередь, вызывают дополнительный компрессионный удар. Давление ударной волны может достигать значительных величин. Особенно опасны случаи возникновения ударной волны за счет теплового объемного расширения в замкнутых полостях – в полости черепа, глаза, грудной клетки и др. Под влиянием мощного лазерного излучения формируются электрохимические и фотохимические эффекты, приводящие к ионизации жидкостных компонентов, образованию новых структур, не свойственных живой материи, в частности свободных радикалов, катализирующих различные химические реакции [10].

К основным хромофорам в организме человека относятся меланин, гемоглобин, оксигемоглобин и вода^{3,4}. Каждый хромофор имеет свой коэффициент поглощения волн разной длины, зависящий от теплопроводности вещества, и именно этот фактор определяет, какое воздействие будет оказано на ту или иную ткань-мишень. Спектр поглощения меланина лежит в ультрафиолетовом (до 400 нм) и видимом (400–760 нм) диапазонах спектра.

¹ Косарев В.В., Бабанов С.А. Профессиональные болезни: учебник / Косарев В.В., Бабанов С.А. М.: ГЭОТАР Медиа, 2010. 368 с.

² Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. 2-е изд., испр. и доп. М.: Физматлит, 2010. 488 с.

³ Лазеро- и светолечение. Доувер Дж.С. М.: Рид Элсивер, 2010. С. 5–7.

⁴ Kaminer MS, Arndt KA, Dover JS, et al. *Atlas of Cosmetic Surgery*. 2nd ed. Saunders: Elsevier, 2009.

Поглощение меланином лазерного излучения по-прежнему уменьшается по мере увеличения длины волны света. Гемоглобин имеет несколько пиков поглощения. Максимумы спектра поглощения гемоглобина лежат в области УФ-А (320–400 нм), фиолетовом (400 нм), зеленом (541 нм) и желтом (577 нм) диапазонах. Коллаген в видимом диапазоне поглощается в спектре от 400 до 760 нм [11]. Однако за счет теплопередачи нагреваются и соседние области, даже если они содержат мало светопоглощающих хромофоров [12, 13], что обуславливает неспецифический эффект лазерного излучения.

К органам-мишеням лазерного излучения относятся кожа и орган зрения. Это связано с большим количеством хромофоров в тканях этих структур. Опасность лазерных лучей для зрительного анализатора и определила основное направление исследований в первые годы, которые сконцентрировались на изучении повреждающего действия излучения на орган зрения.

Вода может составлять до 90 % тканей анатомических структур зрительной системы человека. Это определяет спектральную зависимость оптического пропускания нормального человеческого глаза в области от роговицы до пигментного слоя сетчатки (ретиальный пигментный эпителий – РПЭ) [14]. При непосредственном контакте с глазом лазерного луча с длиной волны в видимой области спектра лазерное излучение беспрепятственно проходит через оптические среды глаза (роговицу, влагу передней камеры, хрусталик и стекловидное тело) и достигает сетчатки [15]. РПЭ содержит мелано-белковые гранулы, которые поглощают большую часть видимого излучения, попадающего в глаз. Именно эта область повреждается в первую очередь [14]. Сетчатка поглощает около 10 % коротковолнового сине-зеленого излучения, в то время как риск повреждения нервных волокон сетчатки в макулярной области еще более повышен, так как желтый пигмент интенсивно поглощает сине-зеленое (особенно синий компонент) излучение. Поэтому синие лазеры считаются более опасными для органа зрения [15].

Известно, что высокоинтенсивное лазерное излучение повреждает все слои сетчатки: возникают ожоги сетчатки, кровоизлияния в сетчатку и прилегающие ткани, в дальнейшем на месте ожога образуется рубец, приводящий к стойкому снижению зрения. При объективном исследовании на сетчатке глаз у части работников выявляются светлые депигментированные очажки [15, 16]. При исследовании функционального состояния зрительного анализатора авторы отметили, что у лиц, обслуживающих импульсные твердотельные лазеры, в 46 % случаев наблюдается снижение темновой адаптации [17].

Данные исследований показывают, что благодаря фокусирующему эффекту плотность потока энергии на сетчатке может быть в 4–5 (до 10) раз выше, чем на роговице глаза, что может привести к карбонизации, абляции тканей и фоторазрыву [15, 18, 19]. Поэтому даже «безопасные» мощности лазерного излучения могут вызвать серьезные травмы при контакте с глазом, в том числе при диффузно рассеянном лазерном свете при соответствующей мощности лазера. Такое излучение используется в так называемых бытовых лазерах, которые доступны широкому кругу пользователей. Часто люди недостаточно осознают всю опасность

для глаз в случаях пренебрежения правилами безопасности.

В последние годы диапазон исследований расширился в связи с выявлением общих реакций организма на воздействие излучения. При работе с лазерами наблюдается целый ряд субъективных расстройств – жалобы на тупые, иногда режущие боли в глазах, ощущение жара и тяжести в висках [20], утомление глаз, затумирование зрения, чувство напряженности и тяжести в глазах, головные боли [21].

Излучение в видимой области спектра, помимо тепловых эффектов, обеспечивает условия для стимуляции фотохимических реакций [22]. Пример активации каталазы в результате поглощения красного света гелий-неоновым лазером его хромофорной группой уже стал классическим [23, 24]. При облучении глаз кроликов гелий-неоновым лазерным излучением (10 дней) в сетчатке и эпителиальном пигменте наблюдалось увеличение общего содержания групп SH и, соответственно, соотношения SH/SS, а также активности ферментов глутатионредуктазы, супероксиддисмутазы и каталазы в 1,5–2,5 раза [25]. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения красной области спектра на химические реакции, протекающие в организме, уже много лет используются в терапии и профилактике различных заболеваний [26–28].

Важно отметить, что зеленый лазер (0,53 мкм) не влиял на активность каталазы ни в пигментном эпителии, ни в сетчатке, незначительно снижая активность супероксиддисмутазы только в пигментном эпителии. Тиолдисульфидная система оставалась стабильной в обеих тканях глаза [29].

Облучение глаза кролика синим лазером привело к резкому сдвигу в сторону окисления в тиолдисульфидной системе сетчатки и к выраженным фазовым изменениям окислительно-восстановительного баланса в пигментном эпителии. Все эти факты позволяют рассматривать синий лазер как повреждающий, а не стимулирующий фактор, в отличие от красного, поскольку происходит окислительная модификация SH-групп белков как в органе-мишени, так и в крови [30].

Медицинские осмотры, проведенные у сотрудников, работающих с лазерным излучением, показали, что невроты астенического типа и патология вегетативно-сосудистой системы в виде вегетососудистых дисфункций и астеновегетативных синдромов достоверно чаще встречались у работающих с лазерами (40 %) по сравнению с лицами контрольной группы (23 %). Сердечно-сосудистые расстройства проявлялись у работающих с лазерами ареактивностью и извращением ответных реакций пульса при орто- и клиностатической пробах, достоверным, по сравнению с контролем, увеличением числа лиц с синусовыми аритмиями и брадиаритмиями на ЭКГ, а также высокими зубцами Т в грудных отведениях, свидетельствующими об экстракардиальных вегетативных воздействиях на сердце. При исследовании общей гемодинамики (по данным механокардиографии) у части обследованных (36 %), отмечалось повышение систолического и особенно среднединамического артериального давления, несоответствие фактического и рабочего удельного периферического сопротивления сосудистой сети (43 %), повышение тонуса сосудов мышечного типа (31 %) и коэффициента тонического напряжения сосудов (64 %).

Почти у половины работающих с лазерами зарегистрировано регионарное повышение тонуса мозговых сосудов. При исследовании функционального состояния вестибулярного анализатора у работающих с вышеуказанными типами лазеров установлено, что, несмотря на отсутствие каких-либо жалоб на головокружение, у большинства работающих отмечено нарушение функции вестибулярного аппарата. Достоверно чаще, чем в контроле, выявлены изменения возбудимости, преимущественно угнетение вестибулярного анализатора, причем в половине случаев эти нарушения касаются центрального отдела анализатора [31].

Таким образом, полученные данные указывают на возможность развития у работающих с лазерами комплекса общих неспецифических реакций организма со стороны нервной и сердечно-сосудистой систем.

Лазерное излучение видимой области спектра широко применяется в развлекательных целях. Если лазерные проекторы больших мощностей, используемые на концертах и зрелищных мероприятиях, требуют согласования и определенных финансовых вложений, то менее мощные домашние проекторы и лазерные указки доступны широкому кругу пользователей, в том числе детям.

Данные экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что воздействие излучения от коммерчески доступной зеленой лазерной указки класса 3A мощностью менее 5 мВт может индуцировать видимую ретинопатию в течение 24 часов после воздействия. Это характеризовалось желтоватым обесцвечиванием на уровне РПЭ в области воздействия. На каждом участке воздействия сохранялись гранулярные изменения в течение 5 дней после воздействия. Гистологическое исследование подтвердило повреждение РПЭ в облучаемых областях [32].

Офтальмоскопическое обследование двух пациентов, которые посетили один и тот же танцевальный фестиваль с лазерным шоу, сканирующим аудиторию, и обратившихся к врачу со снижением остроты зрения после прямого попадания лазера в один глаз, показало пятна коагуляции сетчатки одинакового размера, что привело к кровоизлиянию в сетчатку у обоих пациентов. При этом показатели внутриглазного давления и биомикроскопии были в рамках нормы. Несмотря на благоприятное разрешение геморрагического процесса, у одного из пациентов сохранились остаточные нарушения и у обоих пациентов остался пожизненный риск неоваскуляризации в месте воздействия лазера. В связи с этим пациентам было рекомендовано при возникновении любых изменений при работе органа зрения обращаться к врачу [33].

Эти данные согласуются с другим исследованием, в котором анализировались данные состояния органа зрения семи пациентов (8 глаз). Их средний возраст составил 18,7 года (диапазон: от 12 до 36 лет). В большинстве случаев пациенты в течение нескольких секунд подвергались воздействию зеленого лазера мощностью 5 мВт и в 2 случаях — красного лазера. Все пациенты жаловались на центральную/парацентральную скотому. В 5 глазах при офтальмоскопическом исследовании было отмечено круглое, четко выраженное глубокое желтовато-оранжевое обесцвечивание на уровне пигментного эпителия сетчатки в фовеоле диаметром от 150 до 350 мкм. Дополнительными находками были макулярное субгиалоидное кро-

воизлияние в 2 глазах и макулярное отверстие с цистоидным отеком в 1 глазу. Все пациенты получили терапию кортикостероидами с преднизолоном (0,5–1 мг/кг). Период наблюдения составлял от 2 до 12 месяцев. Со временем улучшение остроты зрения было отмечено в 7 из 8 глаз. Улучшение зрения было связано с полным или почти полным восстановлением целостности макулярной структуры, отмеченным при спектрометрии [34]. Однако 12 лет — не самый младший возраст детей, получивших поражения глаз при контактировании с лазерным лучом. Исследователи описывают случаи поражения зрения у детей в возрасте от 8 до 15 лет лазерными указками, приобретенными онлайн. Клинически у трех детей наблюдалась острая макулопатия, которая привела к изменению пигментного эпителия сетчатки в субфовеальной области и снижению зрения. Один случай осложнился появлением хориоидальной неоваскулярной мембраны [35]. Через 12 месяцев у двух пациентов с помощью микропериметрии было выявлено снижение чувствительности в области центральной ямки сетчатки. SD-ОКТ-визуализация показала стойкое нарушение наружных слоев фовеальных фоторецепторов у всех обследуемых детей [36].

В литературе описан случай повреждения сетчатки отраженным излучением красной лазерной указки. Водитель общественного автобуса подвергся воздействию лазерного луча игрушечной лазерной указки, управляемой школьником с расстояния около 16,5 м. Луч отразился в боковом зеркале заднего вида автобуса, и водитель несколько раз посмотрел на лазерный луч, чтобы определить местоположение человека, держащего лазер. Сразу после этого воздействия водитель пожаловался на «помутнение» зрения в правом глазу, которое сохранялось в течение 6 месяцев [37]. Данная ситуация является не только единичным случаем нанесения вреда здоровью человека, но и угрозой общественной безопасности, так как нанесение вреда водителю транспортного средства может привести к возникновению дорожно-транспортных происшествий и стать причиной аварий.

Обсуждение. Воздействие лазерного излучения на организм человека вызывает специфический и неспецифические ответы на всех уровнях организации тканей. Степень и характер развивающихся морфологических изменений зависят от длины волны излучения, времени воздействия, мощности, энергии и ее плотности на единицу облучаемой поверхности.

Использование лазерного излучения видимой области спектра обусловлено функциональным назначением бытовых установок. Красные, синие и зеленые лучи позволяют проецировать в пространстве изображения во время концертов и массовых мероприятий, а во время учебных процессов помогают фокусировать внимание слушателей на конкретных предметах.

В отличие от невидимого диапазона, видимое излучение кажется более безопасным, так как в некоторых случаях позволяет избежать непреднамеренного попадания лазерного луча в глаз. Однако нарушение техники безопасности приводит к тому, что прямое и диффузно отраженное лазерное излучение высоких мощностей может попадать в глаза зрителям, в числе которых могут находиться дети и пожилые люди. В случае с детьми ситуация может усугубляться тем, что часть из них скрывает факт намеренного или случайного попадания прямого луча в глаз

в связи со страхом наказания и/или обращения к врачу. Часть клинических случаев описывает несовершеннолетних пациентов, обратившихся с нарушением зрения к врачу через несколько месяцев после происшествия и признавших в направлении указки в глаз только после прямого вопроса врача.

Особенности оптической системы глаза за счет эффекта фокусировки обуславливают различие в мощности потока энергии лазерного излучения на роговице и сетчатке в 10 раз. Это говорит о том, что измеряемая мощность лазерного излучения может не соответствовать таковой на сетчатке. При этом, несмотря на то что лазерные указки класса 3А и выше запрещены в некоторых странах, они могут быть свободно приобретены в интернете.

Заключение. Полученные данные указывают на то, что портативные лазерные указки и мощные лазерные проекторы могут нанести заметную травму макулы и в отдельных случаях навсегда повредить зрение. Хотя часто отмечалось хорошее восстановление зрения, общедоступность коммерческих лазерных устройств потенциально опасна, особенно для несовершеннолетних. Следует повысить осведомленность общественности о возможной опасности лазерного излучения и о мерах предосторожности.

Список литературы

1. Александров М.Т., Егоркина Н.С., Черкасов А.С. Проблемы реализации основных принципов лазерной медицины в клинической практике // *Лазеры и аэроионы в медицине: сб. докл., статей, сообщений и исследований.* Калуга—Обнинск, 1997. С. 13—18.
2. Илларионов В.Е. Некоторые биофизические аспекты сочетанного магнитолазерного воздействия на живой организм // *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультурной культуры.* 1989. № 3. С. 19—21.
3. Елисеев В.И. Механизмы взаимодействия низкоэнергетического лазерного излучения ИК-спектра с биологическими тканями // *Лазеры и аэроионы в медицине: сб. докл., статей, сообщений и исследований.* Калуга—Обнинск, 1997. С. 71.
4. Козлов В.И. Взаимодействие лазерного излучения с биотканями // *Применение низкоинтенсивных лазеров в клинической практике.* М.: ГНЦ лазерной медицины, 1997. С. 24—34.
5. Астафьева О.Г., Брилли Г.Е., Петрышева С.Г., Романова Т.П. Изменение сорбции катехоламинов на мембране эритроцитов при воздействии низкоинтенсивного лазерного излучения // *Низкоинтенсивные лазеры в эксперименте и клинике.* Саратов: Саратовский медицинский институт, 1992. С. 8—10.
6. Бородулина Е.В., Кректун А.В., Ратанова Н.Г. Сравнительные аспекты влияния низкоэнергетического электромагнитного излучения видимого диапазона на элементы крови // *Лазерная и магнитная терапия в экспериментальных и клинических исследованиях, тез. докл. Всерос. симпозиум.* Обнинск, 1993. С. 180—181.
7. Атачбаров Б.А., Бойко З.Ф. К механизму лечебного действия монохроматического красного света низкой интенсивности // *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры.* 1980. № 6. С. 53—54.
8. Зубкова С.М., Крылов О.А. Действие гелий-неонового лазера на окислительно-восстановительные процессы в митохондриях // *Вопросы экспериментальной и клинической физиотерапии: тр. ЦНИИ курортологии и физиотерапии.* М., 1976. Т. 32. С. 18—19.
9. Корочкин И.М., Облокулов И.У., Федулаев Ю.Н. Эффективность применения инвазивной гелий-неоновой лазеротерапии в комбинации с тренталом у больных с хронической сердечной недостаточностью // *Лазерная медицина,* 2007. № 11 (2). С. 4—7.
10. Халимов Ю.Ш., Власенко А.Н., Цепкова Г.А., Сосюкин А.Е. Профессиональные заболевания, вызванные воздействием лазерного излучения // *Вестник Российской Военно-медицинской академии.* 2019. № 2 (66). С. 209—214. doi: 10.17816/brmma25946
11. Шептий О.В., Круглова Л.С., Корчажкина Н.Б., Котенко К.В., Яменсков В.В. Механизмы действия различных лазеров и дифференцированные показания к их применению (обзор литературы) // *Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание.* 2014. № 1. С. 156. doi: 10.12737/5812
12. Jacques SL. Role of tissue optics and pulse duration on tissue effects during high-power laser irradiation. *Appl Opt.* 1993;32(13):2447—54. doi: 10.1364/AO.32.002447
13. Shah D, Desai N, Dhanak R. Lasers in facial aesthetics — a review. *Adv Hum Biol.* 2014;4(3):1—6.
14. Желтов Г.И. Нормативы по лазерной безопасности: истоки, уровень, перспективы. *Фотоника.* 2017. № 1 (61). С. 10—35. doi: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.10.35
15. Куликов А.Н., Власенко А.Н., Мальцев Д.С., Коваленко А.В., Коваленко И.Ю. Клинические случаи повреждения глаз излучением лазерных указок // *Вестник Российской Военно-медицинской академии.* 2019. № 3(67). С. 103—106.
16. Мирошниченко А.Б., Кроз С.Ф. О некоторых изменениях функционального состояния организма при обслуживании оптических квантовых генераторов // *Гигиена труда.* 1974. № 4. С. 44—45.
17. Омеляненко Л.М., Комарова А.А. Состояние здоровья работающих с твердотельными лазерами // *Клиника и вопросы экспертизы трудоспособности при заболеваниях, вызванных воздействием физических факторов [Сборник науч. трудов].* М., 1971. С. 99—103.
18. Бойко Э.В., Шишкин М.М., Березин Ю.Д. Диодный лазер в офтальмологической операционной. СПб.: Воен.-мед. акад. 2000. 30 с.
19. Черепнин А.И., Цыганкова А.И., Сипина Ю.В., Елсакова Н.В. Клинические случаи повреждения сетчатки в быту инфракрасным излучением лазерной указки // *Современные технологии в офтальмологии.* 2018. № 2. С. 280—282.
20. Комарова А.А., Маркова Т.Ф. Клинико-физиологическая характеристика состояния нервной системы у лиц, обслуживающих оптические квантовые генераторы // *Гигиена труда.* 1976. № 2. С. 6—12.
21. Малахова Н.Л., Мельникова Н.Д. К вопросу о действии лучей лазера на орган зрения // *Использование ОКТ в науке и технике.* М., 1969. С. 46—49.
22. Шипулин В.М., Андреев С.Л., Вечерский Ю.Ю. и др. Использование лазеров в сердечно-сосудистой хирургии: от эксперимента к практике. Томск: Издательство «СТТ», 2010. 238 с.
23. Деятков Н.Д., Зубова С.М., Лапрун И.В., Макеева Н.С. Физико-химические механизмы биологического действия лазерного излучения // *Успехи современной биологии.* 1987. Т. 103. С. 31—43.
24. Горбатенкова Е.А., Владимиров Ю.А., Парамонов Н.В., Азизова О.А. Красный свет гелий-неонового лазера реактивирует супероксиддисмутазу // *Бюлл. экспер. биол. и мед.* 1989. Т. 107. № 3. С. 302—305.
25. Соколовский В.В., Ушкова И.Н., Березин Ю.Д. и др. О стимулирующем эффекте действия излучения гелий-неонового лазера на глаза кролика // *Офтальмологический журнал.* 1990. № 3. С. 176—178.
26. Малькова Н.Ю., Гребеньков С.В., Чочетова О.А. Использование низкоинтенсивного лазерного излучения в лечении профессиональных заболеваний периферической нервной системы // *Медицина труда и промышленная экология.* 2019. Т. 59. № 8. С. 479—483. doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-8-479-483
27. Малькова Н.Ю., Попов А.В. Использование низкоинтенсивного лазерного излучения для лечения профессионального миофиброза // *Экология человека.* 2018. № 1. С. 26—30. doi: 10.33396/1728-0869-2018-1-26-30
28. Соколов И.А., Малькова Н.Ю. Зрительное утомление в современных условиях и пути его профилактики // *Медицина труда и промышленная экология.* 2018. № 5. С. 39—43. doi: 10.31089/1026-9428-2018-5-39-43
29. Ушкова И.Н., Березин Ю.Д., Покровская Л.А. и др. О стимулирующем эффекте действия излучения лазера длинной волны 0,53 мкм на глаза кроликов // *Офтальмологический журнал.* 1991. № 6. С. 351—352.
30. Ушкова И.Н., Гончарова Л.Л., Покровская Л.А., Малькова Н.Ю., Муратов Е.В. Реакция организма на действие лазерного излучения длиной волны 0,44 мкм // *Врачебное дело.* 1992. № 9 (1002). С. 71—73.
31. Киричинский Б.Р., Шепелев В.Н., Медведовская Ц.П. О влиянии лазерного излучения на организм работающих // *Использование оптических квантовых генераторов в современной технике и медицине: Сборник докл. конф. 31 мая — 3 июня 1971 г. / Под ред. канд. техн. наук Д.П. Лукьянова [и др.].* Л., 1971. С. 108—110.
32. Robertson DM, McLaren JW, Salomao DR, Link TP. Retinopathy from a green laser pointer: a clinicopathologic study. *Arch Ophthalmol.* 2005;123(5):629—633. doi: 10.1001/archophth.123.5.629
33. Boosten K, Van Ginderdeuren R, Spileers W, et al. Laser-induced retinal injury following a recreational laser show:

- two case reports and a clinicopathological study. *Bull Soc Belge Ophthalmol.* 2011;(317):11–16.
34. Mtanes K, Mimouni M, Zayit-Soudry S. Laser pointer-induced maculopathy: More than meets the eye. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus.* 2018;55(5):312–318. doi: 10.3928/01913913-20180405-01
 35. Raof N, Chan TK, Rogers NK, et al. ‘Toy’ laser macular burns in children. *Eye (Lond).* 2014;28(2):231–234. doi: 10.1038/eye.2013.315
 36. Raof N, O’Hagan J, Pawlowska N, Quhill F. ‘Toy’ laser macular burns in children: 12-month update. *Eye (Lond).* 2016;30(3):492–496. doi: 10.1038/eye.2015.222
 37. Thanos S, Böhm M, Meyer zu Hörste M, Schmidt PF. Retinal damage induced by mirror-reflected light from a laser pointer. *BMJ Case Rep.* 2015;2015:bcr2015210311. doi: 10.1136/bcr-2015-210311
- ### References
1. Aleksandrov MT, Yegorkina NS, Cherkasov AS. [Problems of implementing the basic principles of laser medicine in clinical practice.] In: *Lasers and Air Ions in Medicine: A Collection of Articles, Reports and Studies.* Kaluga-Obninsk, 1997:13–18. (In Russ.)
 2. Illarionov VE. [Some biophysical aspects of the combined magnetic laser effect on a living organism.] *Voprosy Kurortologii, Fizioterapii i Lechebnoy Fizicheskoy Kul'tury.* 1989;(3):19–21. (In Russ.)
 3. Yeliseyenko VI. [Mechanisms of interaction of low-energy laser radiation of the IR spectrum with biological tissues.] In: *Lasers and Air Ions in Medicine: A Collection of Articles, Reports and Studies.* Kaluga-Obninsk, 1997:71. (In Russ.)
 4. Kozlov VI. [Interaction of laser radiation with biological tissues.] In: *Application of Low-Intensity Lasers in Clinical Practice.* Moscow: GNTs Lazernoy Meditsiny Publ., 1997:24–34. (In Russ.)
 5. Astaf'yeva OG, Brill' GE, Petrysheva SG, Romanova TP. [Changes in the sorption of catecholamines on the erythrocyte membrane under the influence of low-intensity laser radiation.] In: *Low-Intensity Lasers in Experiment and Clinic: Collection of Scientific Papers.* Saratov: Saratovskiy Meditsinskiy Institut Publ., 1992:8–10. (In Russ.)
 6. Borodulina EV, Krektun AV, Ratanova NG. [Comparative aspects of effects of low-energy electromagnetic radiation in the visible range on blood elements.] In: *Laser and Magnetic Therapy in Experimental and Clinical Research: Proceedings of the Russian Symposium.* Obninsk; 1993:180–181. (In Russ.)
 7. Atchabarov BA, Boyko ZF. [On the mechanism of therapeutic action of low-intensity monochromatic red light.] *Voprosy Kurortologii, Fizioterapii i Lechebnoy Fizicheskoy Kul'tury.* 1980;(6):53–54. (In Russ.)
 8. Zubkova SM, Krylov OA. [Effect of a helium-neon laser on redox processes in mitochondria.] In: *Issues of Experimental and Clinical Physiotherapy: Scientific Works of the Central Research Institute of Balneology and Physiotherapy.* Moscow, 1976;32:18–19. (In Russ.)
 9. Korochkin IM, Oblokulov IU, Fedulajev YuN. The efficiency of combination of invasive He-Ne lasertherapy and preparation trental in patients with chronic cardiac insufficiency. *Lazernaya Meditsina.* 2007;11(2):4–7. (In Russ.)
 10. Khalimov YS, Vlasenko AN, Tsepkova GA, Sosukin AE. Occupational diseases caused by exposure to laser radiation. *Vestnik Rossiyskoy Voenno-Meditsinskoy Akademii.* 2019;(2(66)):209–214. (In Russ.) doi: 10.17816/brmma25946
 11. Sheptiy OV, Vlasenko AN, Korchazhkina NB, Kotenko KV, Yamenskov VV. Action mechanisms of various lasers and the differentiated indications to their application (review). *Vestnik Novykh Meditsinskikh Tekhnologiy. E-edition.* 2014;(1):156. (In Russ.) doi: 10.12737/5812
 12. Jacques SL. Role of tissue optics and pulse duration on tissue effects during high-power laser irradiation. *Appl Opt.* 1993;32(13):2447–54. doi: 10.1364/AO.32.002447
 13. Shah D, Desai N, Dhanak R. Lasers in facial aesthetics — a review. *Adv Hum Biol.* 2014;4(3):1–6.
 14. Zheltov GI. Standards for laser safety: origins, level, perspectives. *Fotonika.* 2017;(1(61)):10–35. (In Russ.) doi: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.10.35
 15. Kulikov AN, Vlasenko AN, Maltsev DS, Kovalenko AV, Kovalenko IYu. Retinal injury from laser pointers: case series. *Vestnik Rossiyskoy Voenno-Meditsinskoy Akademii.* 2019;(3(67)):103–106. (In Russ.)
 16. Miroshnichenko AB, Kroz SF. [On some changes in the functional state of the body during the maintenance of optical quantum generators.] *Gigiena Truda.* 1974;(4):44–45. (In Russ.)
 17. Omel'yanenko LM, Komarova AA. [Health status of workers handling solid-state lasers.] In: *Clinical Picture and Issues of Expert Examination of Ability to Work in Cases of Diseases Induced by Physical Factors: Collection of Scientific Works.* Moscow; 1971: 99–103. (In Russ.)
 18. Boyko EV, Shishkin MM, Berezin YuD. [Diode laser in the ophthalmic operating theater.] St. Petersburg: Voen.-Med. Akad. Publ., 2000. (In Russ.)
 19. Cherepnin AI, Tsygankova AI, Sipina YuV, Elsakova NV. [Clinical cases of retinal damage in the household by infrared radiation from a laser pointer.] *Sovremennye Tekhnologii v Oftal'mologii.* 2018;(2):280–282. (In Russ.)
 20. Komarova AA, Markova TF. [Clinical and physiological characteristics of the nervous system in persons serving optical quantum generators.] *Gigiena Truda.* 1976;(2):6–12. (In Russ.)
 21. Malakhova NL, Mel'nikova ND. [On the effect of laser beams on the organ of vision.] In: *Laser Applications in Science and Technology.* Moscow, 1969:46–49. (In Russ.)
 22. Shipulin VM, Andreyev SL, Vecherskiy YuYu, et al. [Application of lasers in cardiovascular surgery: from experiment to practice.] Tomsk: STT Publ., 2010. (In Russ.)
 23. Devyatkov ND, Zubova SM, Laprun IV, Makeeva NS. Physical and chemical mechanisms of the biological action of laser radiation. *Uspekhi Sovremennoy Biologii.* 1987;103:31–43. (In Russ.)
 24. Gorbatenkova EA, Vladimirov YuA, Paramonov NV, Azizova OA. Red light of a helium-neon laser reactivates superoxide dismutase. *Byulleten' Eksperimental'noy Biologii i Meditsiny.* 1989;107(3):302–305. (In Russ.)
 25. Sokolovskiy VV, Ushkova IN, Berezin YuD, et al. [On the stimulating effect of radiation of a helium-neon laser on rabbit's eyes.] *Oftal'mologicheskii Zhurnal.* 1990;(3):176–178. (In Russ.)
 26. Malkova NYu, Grebenkov SV, Kochetova OA. The use of low-intensity laser radiation in the treatment of occupational diseases of the peripheral nervous system. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya.* 2019;59(8):479–483. (In Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-8-479-483
 27. Mal'kova NYu, Popov AV. Use of low-level laser radiation for occupational myofibrosis treatment. *Ekologiya Cheloveka [Human Ecology].* 2018;(1):26–30. (In Russ.) doi: 10.33396/1728-0869-2018-1-26-30
 28. Sokolov IA, Mal'kova NYu. Visual fatigue nowadays and ways of its prevention. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya.* 2018;(5):39–43. (In Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2018-5-39-43
 29. Ushkova IN, Berezin YuD, Pokrovskaya LA, et al. [About the stimulating effect of laser irradiation at 0.53 μm wavelength on rabbits' eyes.] *Oftal'mologicheskii Zhurnal.* 1991;(6):351–352. (In Russ.)
 30. Ushkova IN, Goncharova LL, Pokrovskaya LA, Mal'kova NYu, Muratov EV. [Reaction of the body to laser irradiation at 0.44 μm wavelength.] *Vrachebnoe Delo.* 1992;(9(1002)):71–73. (In Russ.)
 31. Kirichinskiy BR, Shepelev VN, Medvedovskaya TsP. [About health effects of laser radiation in workers.] In: *Application of Optical Quantum Generators in Modern Technology and Medicine: Proceedings of the Conference, Leningrad, May 31 – June 3, 1971.* Lukyanov DP, ed. Leningrad, 1971:108–110. (In Russ.)
 32. Robertson DM, McLaren JW, Salomao DR, Link TP. Retinopathy from a green laser pointer: a clinicopathologic study. *Arch Ophthalmol.* 2005;123(5):629–633. doi: 10.1001/archophth.123.5.629
 33. Boosten K, Van Ginderdeuren R, Spileers W, et al. Laser-induced retinal injury following a recreational laser show: two case reports and a clinicopathological study. *Bull Soc Belge Ophthalmol.* 2011;(317):11–16.
 34. Mtanes K, Mimouni M, Zayit-Soudry S. Laser pointer-induced maculopathy: More than meets the eye. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus.* 2018;55(5):312–318. doi: 10.3928/01913913-20180405-01
 35. Raof N, Chan TK, Rogers NK, et al. ‘Toy’ laser macular burns in children. *Eye (Lond).* 2014;28(2):231–234. doi: 10.1038/eye.2013.315
 36. Raof N, O’Hagan J, Pawlowska N, Quhill F. ‘Toy’ laser macular burns in children: 12-month update. *Eye (Lond).* 2016;30(3):492–496. doi: 10.1038/eye.2015.222
 37. Thanos S, Böhm M, Meyer zu Hörste M, Schmidt PF. Retinal damage induced by mirror-reflected light from a laser pointer. *BMJ Case Rep.* 2015;2015:bcr2015210311. doi: 10.1136/bcr-2015-210311

