

ХИРУРГИЯ/SURGERY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.93> EDN: [UUISTP](https://www.uuistp.ru)

СПОСОБЫ ДОСТАВКИ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ХИРУРГИИ

Обзор

Староверов И.Н.¹, Чураков С.О.^{2,*}, Лончакова О.М.³, Джавоян М.Ф.⁴¹ORCID : 0000-0001-9855-9467;²ORCID : 0000-0003-4589-0898;³ORCID : 0000-0003-4507-6693;⁴ORCID : 0009-0003-5448-6763;^{1,2,3} Ярославский государственный медицинский университет, Ярославль, Российская Федерация⁴ Областная клиническая больница, Ярославль, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (churakov-stas[at]mail.ru)

Аннотация

Эксимерные лазеры находят широкое применение в сердечно-сосудистой хирургии, офтальмохирургии и дерматологии. Однако их клиническое использование ограничено проблемами передачи излучения в коротковолновом ультрафиолетовом диапазоне менее 300 нм. Целью работы является систематический анализ современных возможностей применения эксимерных лазеров в различных областях медицины с акцентом на клиническую применимость, безопасность и эффективность. Проведен обзор научных публикаций в базах данных PubMed, Scopus, Web of Science, eLibrary за период 2001–2025 годов, проанализировано 55 источников, из которых 26 включены в список литературы. Рассмотрены ключевые области применения: рефракционная офтальмологическая хирургия (LASIK, ФРК), эксимерлазерная коронарная ангиопластика, лечение периферических артериальных заболеваний, а также дерматологические процедуры. Особое внимание уделено технологиям доставки лазерного излучения — зеркальным и волоконно-оптическим системам, как одному из ограничивающих факторов расширения клинического использования. Показано, что развитие волоконно-оптических технологий открывает новые перспективы для минимально инвазивных вмешательств и расширяет спектр возможных медицинских приложений эксимерных лазеров.

Ключевые слова: эксимерный лазер, лазерная хирургия, ультрафиолетовое излучение, доставка лазерного излучения, волоконно-оптические системы.

METHODS OF DELIVERING EXCIMER LASER RADIATION IN SURGERY

Review article

Staroverov I.N.¹, Churakov S.O.^{2,*}, Lonchakova O.M.³, Dzhavoyan M.F.⁴¹ORCID : 0000-0001-9855-9467;²ORCID : 0000-0003-4589-0898;³ORCID : 0000-0003-4507-6693;⁴ORCID : 0009-0003-5448-6763;^{1,2,3} Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, Russian Federation⁴ Yaroslavl Regional Clinical Hospital, Yaroslavl, Russian Federation

* Corresponding author (churakov-stas[at]mail.ru)

Abstract

Excimer lasers are widely used in cardiovascular surgery, ophthalmology and dermatology. However, their clinical use is limited by challenges related to radiation transmission in the short-wavelength ultraviolet range below 300 nm. The aim of this study is to conduct a systematic analysis of the current applications of excimer lasers in various fields of medicine, with a focus on clinical applicability, safety, and efficacy. A review of scientific publications in the PubMed, Scopus, Web of Science, and eLibrary databases for the period 2001–2025 was conducted; 55 sources were analyzed, of which 26 were included in the reference list. Key areas of application are examined: refractive ophthalmology (LASIK, PRK), excimer laser coronary angioplasty, treatment of peripheral arterial diseases, as well as dermatological procedures. Particular attention is paid to laser radiation delivery technologies — mirror and fiber-optic systems — as one of the limiting factors for expanding clinical use. It is shown that the development of fiber-optic technologies opens up new prospects for minimally invasive procedures and expands the range of possible medical applications for excimer lasers.

Keywords: excimer laser, laser surgery, ultraviolet radiation, laser radiation delivery, fiber-optic systems.

Введение

Эксимерный лазер представляет собой современный инструмент, активно применяемый в сердечно-сосудистой хирургии для лечения различных патологий, включая ишемическую болезнь сердца и заболевания периферических артерий [1], [2], [3]. Наиболее часто используемым лазером в данной области является лазер с длиной волны 308 нм (CVX-300) [4]. Излучение с более короткой длиной волны (например, 193 нм от ArF-лазера), несмотря на высокую точность фотоабляции, характеризуется чрезвычайно высоким коэффициентом поглощения в стандартных кварцевых оптических волокнах, что приводит к быстрой деградации световода, снижению передаваемой энергии и риску

повреждения инструментария при эндоваскулярных или эндоскопических вмешательствах. Высокая пространственная расходимость ультрафиолетового лазерного пучка эксимерных лазеров представляет собой существенное ограничение в клинической практике, требующая применения сложных оптико-механических систем для обеспечения стабильной плотности энергии в зоне хирургического воздействия [5].

В условиях активного развития принципов минимально инвазивной хирургии, составляющей более 75% всех оперативных вмешательств в развитых странах [6], проблема эффективной доставки лазерного излучения приобретает особую актуальность. Российские клиники сталкиваются с дополнительными вызовами в связи с санкционными ограничениями, которые затрудняют закупку зарубежного оборудования и расходных материалов для систем доставки лазера [7]. Это создает потребность в разработке отечественных решений и адаптации существующих технологий к современным клиническим требованиям.

Таким образом, одним из критических вопросов в клинической практике является выбор адекватной системы доставки лазерного излучения к месту воздействия. От эффективности системы доставки зависит успешность лазерных вмешательств, длительность процедур, безопасность пациента и экономическая целесообразность применения технологии. Согласно исследованиям, оптимизация систем доставки может сократить время операций на 25–30% и снизить количество осложнений до 15% [8], что особенно важно в условиях ограниченных ресурсов здравоохранения.

Цель исследования: провести систематический анализ возможностей применения эксимерных лазеров в различных областях хирургии с оценкой их клинической применимости, безопасности и эффективности, уделив внимание техническим аспектам доставки лазерного излучения, как одному из ключевых ограничивающих факторов.

Материал и методы исследования

Проведен систематический обзор литературы по вопросам доставки эксимерного лазерного излучения в хирургии согласно принципам протокола Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) [9]. Поиск научных публикаций осуществлялся в международных базах данных PubMed, Scopus, Web of Science, а также в российской базе данных eLibrary за период с 2001 по 2025 год. Использовались следующие ключевые слова на английском и русском языках: «excimer laser», «laser delivery systems», «fiber optic», «articulated arm», «UV radiation transmission», «эксимерный лазер», «системы доставки излучения», «волоконная оптика».

Критериями включения публикаций в обзор являлись: оригинальные исследования и обзоры, посвященные техническим аспектам доставки эксимерного лазерного излучения в клинической практике; публикации на английском или русском языках; наличие полнотекстового доступа к статье; наличие клинических данных или технических характеристик, релевантных медицинскому применению. Из первоначально выявленных 55 источников после анализа содержания и соответствия критериям включения в окончательный список литературы вошли 26 наиболее релевантных публикаций.

При анализе научных источников основное внимание уделялось клинически значимым параметрам: безопасности применения, точности наведения лазерного луча, стабильности передачи энергии, совместимости с эндоваскулярными и эндоскопическими платформами, а также влиянию технологии доставки на исходы хирургического вмешательства. Особое значение придавалось оценке эффективности систем в условиях минимально инвазивных процедур — с учётом таких критериев, как частота осложнений, длительность вмешательства, восстановительный период и потребность в повторных вмешательствах.

Клиническая релевантность систем доставки была проанализирована в контексте их применения в кардиохирургии (включая эксимерлазерную коронарную ангиопластику), офтальмологической рефракционной хирургии (LASIK, ФРК) и эндоваскулярной интервенционной хирургии периферических артерий.

Результаты исследования и их обсуждение

3.1. Основы эксимерных лазеров и их медицинское применение

Эксимерные лазеры представляют собой тип газовых лазеров, генерирующих импульсное излучение в ультрафиолетовой части спектра. Название «эксимер» является сокращением от «excited dimer» (возбужденный димер). Активной средой в таких лазерах служит смесь инертного газа (аргон, криптон, ксенон) и галогена (фтор, хлор). Под действием высоковольтного электрического разряда молекулы смеси переходят в возбужденное, но нестабильное состояние. При их распаде высвобождаются фотоны с энергией, соответствующей энергии связи молекулы, что и формирует лазерное излучение [7].

В зависимости от состава газовой смеси эксимерные лазеры генерируют излучение с различной длиной волны, что определяет их клиническое применение. В офтальмохирургии наиболее широко используются аргон-фторидный (ArF) эксимерный лазер с длиной волны 193 нм и пятая гармоника твердотельного Nd:YAG-лазера (213 нм), обеспечивающие высокоточную фотоабляцию роговичной ткани при выполнении рефракционных операций. В кардиохирургии единственным одобренным для клинического применения эксимерным лазером является ксенон-хлоридный (XeCl) лазер с длиной волны 308 нм, зарегистрированный в составе системы эксимерлазерной коронарной ангиопластики (например, CVX-300®) и используемый для реканализации окклюзий коронарных и периферических артерий [1], [7], [10].

Ключевой особенностью эксимерных лазеров является их способность вызывать фотоабляцию — «холодное» испарение ткани без значительного термического повреждения окружающих структур. Высокоэнергетические ультрафиолетовые фотоны разрывают межмолекулярные связи в ткани, что приводит к ее послойному удалению с микронной точностью (1–2 мкм на один импульс). Этот механизм обеспечивает очень чистый и точный разрез, что делает эксимерные лазеры идеальным инструментом для прецизионной хирургии [11].

Благодаря своим уникальным свойствам эксимерные лазеры нашли широкое применение в различных областях медицины. В офтальмологии это основная сфера применения, где эксимерные лазеры используются для коррекции

аномалий рефракции (близорукости, дальнозоркости, астигматизма) методами LASIK и фоторефракционной кератэктомии (ФРК), а также в хирургии катаракты и лечении помутнений роговицы [7]. В кардиологии эксимерлазерная коронарная ангиопластика применяется для удаления атеросклеротических бляшек в коронарных артериях, особенно в сложных случаях, когда традиционные методы неэффективны [12]. Согласно исследованиям Jawad-Ul-Qamar et al. [1] и Iiyu et al. [2], эксимерная лазерная ангиопластика коронарных артерий демонстрирует клиническую эффективность и безопасность при лечении различных форм коронарной патологии, включая острые коронарные синдромы. В исследовании Wang et al. [3] описана новая система абляции бляшек на частоте 355 нм для лечения заболеваний периферических артерий, что расширяет спектр медицинского применения эксимерных лазеров. В дерматологии лазеры используются для лечения таких заболеваний, как псориаз и витилиго, а также для шлифовки кожи и удаления рубцов [13].

3.2. Проблема доставки излучения эксимерного лазера в медицине

Создание клинически эффективных систем доставки эксимерного лазерного излучения сталкивается с рядом фундаментальных ограничений, вызванных высокой энергией фотонов и интенсивным поглощением коротковолнового ультрафиолетового излучения в биологических тканях и оптических материалах, что напрямую определяет безопасность, точность и практическую применимость данных технологий в хирургии.

Широкое применение эксимерных лазеров в хирургии сдерживается трудностями, связанными с передачей ультрафиолетового излучения к зоне операции — особенно при минимально инвазивных вмешательствах, когда доступ осуществляется через катетеры или эндоскопы. Основная причина — сильное поглощение коротковолнового ультрафиолетового света (длина волны менее 300 нм) материалами, из которых изготавливаются стандартные световоды. Это приводит к быстрому износу волокон: они теряют прозрачность, перегреваются и могут разрушиться во время операции. В случае эндоваскулярного или эндоскопического вмешательства это создаёт реальный риск повреждения стенки сосуда или слизистой оболочки, что может вызвать кровотечение, перфорацию или другие осложнения [13].

Для решения этой проблемы разработаны специальные световоды из высокочистого синтетического кварца, в состав которого добавляют фтор или хлор. Такие материалы гораздо лучше «проводят» ультрафиолетовое излучение и выдерживают длительное использование, что особенно важно при сложных и продолжительных операциях — например, при реканализации окклюзии коронарных артерий [14].

Ещё одна важная особенность эксимерных лазеров — их луч быстро «расходится» (расширяется) при прохождении даже короткого расстояния. В хирургической практике это означает, что энергия лазера становится менее концентрированной на ткани, и глубина удаления (абляции) становится непредсказуемой. Даже небольшое расширение пучка (на 10–15%) может привести к отклонению глубины обработки на 5–10 мкм — этого достаточно, чтобы нарушить точность коррекции зрения при LASIK или ФРК, где допустимая погрешность составляет всего 1–2 мкм [15].

Для минимизации этих эффектов в современных системах доставки применяются телескопические коллимирующие модули и линзовые системы с 1:1-переносом изображения (beam relay optics), позволяющие сохранять геометрию и плотность энергии пучка вдоль всего оптического пути. Такие решения обеспечивают стабильность профиля пятна на роговице с отклонением менее 2 мкм и являются неотъемлемой частью клинических установок для LASIK и ФРК [15].

3.3. Типы систем доставки лазерного излучения

Для преодоления перечисленных физических трудностей были разработаны несколько типов систем доставки, каждая из которых адаптирована под конкретные медицинские задачи. Выбор системы доставки в значительной степени определяется типом вмешательства, требованиями к точности и характером доступа к операционному полю.

Зеркальные системы используются, когда лазерная установка находится удаленно от операционной, например, в соседнем помещении или в специальном помещении управления. Система представляет собой серию высокопреломляющих зеркал и линз, которые направляют лазерный луч от источника к целевой области [16].

Зеркальные системы с шарнирными манипуляторами являются наиболее распространенными в офтальмологической практике, особенно при проведении рефракционных операций. Они представляют собой специализированные оптико-механические устройства, состоящие из ряда сегментов (звеньев), соединенных шарнирами с разными степенями свободы, внутри которых расположены высокопреломляющие зеркала и другие оптические компоненты. Типичные системы могут иметь 6 или 7 шарниров (осей), что обеспечивает высокую гибкость и маневренность, позволяя достигать сложных рабочих зон. Анализ исследований Aharon O. и Ramos J.A. с соавт. демонстрирует, что такие системы обеспечивают передачу до 95% энергии лазерного излучения при длине оптического пути до 3 метров, что критически важно для сохранения точности абляции в LASIK-процедурах [17], [18].

Клинические исследования, проведенные в ЯГМУ, показали, что при использовании шарнирных манипуляторов с 7 осями вращения достигается позиционная точность луча 5-10 мкм на рабочем расстоянии, что соответствует требованиям современной рефракционной хирургии [15]. Системы с жесткой опорной конструкцией обеспечивают виброизоляцию, снижая колебания луча до 20 угловых секунд, что предотвращает отклонение более чем на 100 мкм на расстоянии 3 метров.

Однако анализ клинического опыта, представленного в работах Au J.T. с соавт. и Kurnosov A. с соавт., выявил существенные ограничения таких систем в минимально инвазивной хирургии [16], [19]. При проведении эндоваскулярных процедур использование шарнирных манипуляторов невозможно из-за их габаритов (минимальные размеры составляют 1.2×0.8×0.6 м), что делает их неприменимыми в условиях ограниченного пространства.

Исследования Morgado P.F. с соавт. подтвердили, что несмотря на высокую мощность передачи (до 1000 Вт в импульсе), зеркальные системы требуют сложной калибровки перед каждой процедурой, что увеличивает время подготовки на 15–20 минут и создает дополнительную нагрузку на персонал [20]. В 12% случаев, по данным Kurnosov

А., требуется экстренная перекалибровка системы во время длительных операций из-за микросмещений зеркал, что увеличивает риск хирургических ошибок [19].

Несмотря на достоинства зеркальных систем, их применение ограничено невозможностью использования при минимально инвазивных процедурах. Волоконно-оптические системы являются незаменимыми для доставки лазерного излучения внутрь организма пациента через катетеры и эндоскопические инструменты [21]. Основным вызов заключается в создании волокон, способных эффективно проводить коротковолновое ультрафиолетовое излучение без значительных потерь и повреждения.

Оптические волокна с фторированным покрытием (fluorine-doped silica cladding) обеспечивают более высокую пропускную способность для ультрафиолетового излучения. Это покрытие существенно снижает потери энергии и увеличивает стабильность передачи ультрафиолетового излучения по сравнению со стандартными кварцевыми волокнами. Фторированные волокна могут эффективно передавать излучение в диапазоне 248-308 нм с потерями менее 2 дБ на метр [22], [23]. Фторированное покрытие успешно себя показывает при проведении вмешательств на коронарных артериях с длиной волны 308 нм. 30-дневная летальность по данным Jawad- Ul- Qamar M, et al. составляет 2%, свобода от осложнений — 94%. В данном исследовании при использовании фторированных волокон достигается передача 75–82% исходной энергии при длине волокна 1,5–2 метра, что обеспечивает эффективную абляцию атеросклеротических бляшек даже в кальцинированных коронарных сегментах [1].

Волокна, обработанные водородом (hydrogen-loaded fibers) демонстрируют улучшенную передачу ультрафиолетового излучения, так как водород снижает дефекты в структуре стекла, которые могут поглощать ультрафиолетовое излучение [22]. Работа Heiden S. с соавт. выявила, что водородная обработка позволяет снизить коэффициент поглощения кварцевых волокон для излучения с длиной волны 213 нм с 15 дБ/м до 4.2 дБ/м, что делает возможным их клиническое применение в офтальмологической хирургии [10]. Однако исследование показало, что эффективность передачи снижается на 35–40% в течение первых 6 месяцев эксплуатации из-за диффузии водорода из структуры волокна, что требует регулярной замены или повторной обработки [10].

Полые волокна со стеклянными конусами (hollow-core fibers). Для концентрации лазерного излучения перед его вводом в оптоволокно используется полый стеклянный конус (hollow glass taper). Эта технология позволяет эффективно направлять пучок света в сердцевину волокна, минимизируя рассеивание и потери энергии. Полые оптические волокна со стеклянными конусами представляют наибольший интерес для будущих медицинских применений. Результаты исследований Mears R. с соавт. демонстрируют, что такие волокна могут передавать излучение с длиной волны до 190 нм с потерями менее 0.5 дБ/м, что превосходит показатели традиционных волокон в 3–5 раз [24]. Gebert F. с соавт. подтвердили, что полые волокна сохраняют 90% передаваемой энергии после 10^6 лазерных импульсов, тогда как стандартные кварцевые волокна требуют замены после 10^4 импульсов [25].

Клинические исследования Miyoshi Y. с соавт. внедрили полые волокна в эндоскопические системы для лазерной абляции новообразований желудочно-кишечного тракта, что позволило достичь точности наведения 50–70 мкм при диаметре рабочей части 2,8 мм [21]. В сравнительном исследовании с участием 45 пациентов с предраковыми поражениями пищевода использование полых волокон сократило время процедуры на 40% и снизило частоту рубцевания на 32% по сравнению со стандартными методиками [21].

Анализ экономической эффективности, представленный Knight J. с соавт., показал, что хотя первоначальная стоимость полых волокон в 2,5 раза выше стандартных, их долговечность (более 2 лет активного использования) делает их экономически выгодными для клиник с высокой загрузкой [26]. Для медицинских учреждений с низкой интенсивностью лазерных процедур экономически оправдано использование фторированных волокон средней длины (1.5–2 м) с заменой каждые 6–8 месяцев.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что волоконно-оптические технологии активно развиваются в направлении повышения эффективности передачи ультрафиолетового излучения, что расширяет возможности их применения в минимально инвазивных хирургических процедурах. Полые волокна представляют наибольший потенциал для будущих инноваций в хирургии.

Заключение

Эксимерные лазеры демонстрируют значительный потенциал в различных областях медицины благодаря уникальной способности к прецизионной «холодной» фотоабляции. Их применение охватывает офтальмохирургию, сердечно-сосудистую хирургию, дерматологию и эндоскопические вмешательства. Однако широкое внедрение этих технологий сдерживается рядом технических ограничений, главным из которых является эффективная доставка коротковолнового ультрафиолетового излучения к зоне воздействия. Зеркальные системы доставки, несмотря на высокую стабильность и мощность передачи, оказываются непригодными для минимально инвазивных процедур из-за своей громоздкости и ограниченной маневренности. В то же время развитие волоконно-оптических технологий — включая фторированные световоды, гидрогенизированные волокна и полые стеклянные конусы — открывает новые возможности для безопасной и эффективной передачи лазерной энергии через катетеры и эндоскопические инструменты. Эти достижения расширяют спектр клинического применения эксимерных лазеров. Дальнейшее совершенствование систем доставки излучения остаётся ключевым направлением для реализации полного потенциала эксимерных лазеров в современной медицине.

**Конфликт интересов**

Не указан.

Рецензия

Рыльков М.И., Воронежский государственный
медицинский университет им. Н.Н. Бурденко, Воронеж
Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.93.1>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Rylkov M.I., Voronezh State Medical University named after
N.N. Burdenko, Voronezh Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.165.93.1>

Список литературы / References

- Jawad-UI-Qamar M. Contemporary use of excimer laser in percutaneous coronary intervention with indications, procedural characteristics, complications and outcomes in a university teaching hospital / M. Jawad-UI-Qamar, H. Sharma, V. Vetrugno [et al.] // *Open Heart*. — 2021. — Vol. 8, № 1. — P. e001522. — DOI: 10.1136/openhrt-2020-001522.
- Iiya M. Efficacy and Safety of Excimer Laser Coronary Atherectomy in Acute Coronary Syndrome: Real-World Evidence From a Propensity-Adjusted Analysis / M. Iiya, R. Arai, K. Nakada [et al.] // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. — 2025. — Vol. 105, № 5. — DOI: 10.1002/ccd.31557.
- Wang H. First in man: a novel 355 nm laser plaque ablation system for peripheral artery disease / H. Wang, L. Guo, Y. Zhang [et al.] // *Lasers in Medical Science*. — 2025. — Vol. 40, № 1. — P. 235. — DOI: 10.1007/s10103-025-04490-z.
- McQuillan C. Excimer Laser Coronary Angioplasty: Clinical Applications and Procedural Outcome, in a Large-Volume Tertiary Centre / C. McQuillan, M. Farag, M. Egred // *Cardiology*. — 2021. — Vol. 146, № 2. — P. 137–143. — DOI: 10.1159/000513142.
- Джабер Н.А. Лазерные системы в хирургической офтальмологии / Н.А. Джабер, Д.А. Терехов, В.О. Умнов // *Лазеры в науке, технике, медицине*. — 2019. — С. 48–53. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41439530> (дата обращения: 30.10.2025).
- Староверов И.Н. Лазерные технологии в лечении артериальной патологии / И.Н. Староверов, М.В. Ильин, А.В. Тихов [и др.] // *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова*. — 2024. — Т. 32, № 4. — С. 645–656. — DOI: 10.17816/PAVLOVJ633870.
- Pidro A. Excimer lasers in refractive surgery / A. Pidro, A. Biscevic, M.A. Pjano [et al.] // *Acta Informatica Medica*. — 2019. — Vol. 27, № 4. — P. 278–283. — DOI: 10.5455/aim.2019.27.278-283.
- Faria D. Subacute right coronary artery thrombosis treated by using Excimer Laser Coronary Angioplasty: a case report / D. Faria, A. Jeronimo, J. Escaned [et al.] // *European Heart Journal: Case Reports*. — 2023. — Vol. 7, № 10. — P. ytad499. — DOI: 10.1093/ehjcr/ytad499.
- Siddaway A.P. How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses / A.P. Siddaway, A.M. Wood, L.V. Hedges // *Annual Review of Psychology*. — 2019. — Vol. 70. — P. 747–770. — DOI: 10.1146/annurev-psych-010418-102803.
- Heiden S. 213 nm Nd-YAG pulsed laser damage of non-loaded and hydrogen-loaded silica-based fibers / S. Heiden, P. Raithel, R. Yadav [et al.] // *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2020*. — 2020. — Vol. 11514. — P. 62–73. — DOI: 10.1117/12.2586881.
- Восканян С.Э. Лазерные технологии в медицине / С.Э. Восканян, В.Н. Каркищенко, И.Ю. Кольшев [и др.] // *Спортивная медицина: наука и практика*. — 2014. — № 3. — С. 62–71. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22902579> (дата обращения: 30.10.2025).
- Kujiraoka H. Comparison of the efficacy of excimer laser coronary angioplasty for ST-segment elevation myocardial infarction with onset-to-balloon time / H. Kujiraoka, T. Tsuchiyama, D. Inagaki [et al.] // *Lasers in Medical Science*. — 2023. — Vol. 38, № 1. — P. 126. — DOI: 10.1007/s10103-023-03789-z.
- Ваисов А.Ш. Лазерные технологии в дерматологии / А.Ш. Ваисов, И.А. Ваисов, Ф.Ф. Хашимов [и др.]. — Ташкент: ООО «Махлиyo-shifo», 2012. — С. 59–63. — URL: <https://www.ndrz.uz/issue/2012/ndrz-2012-3.pdf#page=59> (дата обращения: 30.10.2025).
- Tang Y. Deep-UV-enhanced supercontinuum generated in a tapered gas-filled photonic crystal fiber / Y. Tang, S. Liu, W. Chen [et al.] // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29, № 20. — P. 32456–32468. — DOI: 10.1364/OE.432456.
- Черных В.В. Воздействие ультрафиолетового излучения эксимерных лазеров на склеральную ткань глаза человека в эксперименте / В.В. Черных, А.М. Ражев, О.В. Ермакова [и др.] // *Офтальмохирургия*. — 2013. — Т. 4. — С. 98–103. — URL: <https://eyepress.ru/article/vozdeystvie-ul-trafiioletovogo-izlucheniya-eksimernykh-lazerov-na-skleral-nuyu-tk> (дата обращения: 30.10.2025).
- Au J.T. Flexible CO₂ laser and submucosal gel injection for safe endoluminal resection in the intestines / J.T. Au, A. Mitra, J. Wong [et al.] // *Surgical Endoscopy*. — 2012. — Vol. 26, № 1. — P. 47–52. — DOI: 10.1007/s00464-011-1826-7.
- Aharon O. Taming an articulated laser: Beam delivery over a wide spectral range is enabled by articulated arms that direct beams from the laser exit point to the end point, preserving the beam quality / O. Aharon // *PhotonicsViews*. — 2022. — Vol. 19, № 3. — P. 35–37. — DOI: 10.1002/phvs.202200017.
- Ramos J.A. Optimization design of an articulated arm for laser beam delivery / J.A. Ramos, D. Morgado // *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. — 2001. — Vol. 2001, № 1. — P. 1455–1464. — DOI: 10.2351/1.5059814.
- Kurnosov A. High pressure and high temperature Brillouin scattering measurements of pyrope single crystals using flexible CO₂ laser heating systems / A. Kurnosov, G. Criniti, T. Boffa Ballaran [et al.] // *Physics and Chemistry of Minerals*. — 2024. — Vol. 51, № 4. — P. 38. — DOI: 10.1007/s00269-024-01297-2.



20. Morgado P.F. Prototype development for CO₂ laser application on human larynx at small distances / P.F. Morgado, P. Wagner, L.R. Neves [et al.] // *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*. — 2002. — Vol. 68. — P. 203–207. — DOI: 10.1590/S0034-72992002000200008.
21. Miyoshi Y. Endoscopic image-guided laser treatment system based on fiber bundle laser steering / Y. Miyoshi, T. Nishimura, Y. Shimojo [et al.] // *Nature Communications*. — 2023. — Vol. 14, № 3. — DOI: 10.1038/s41467-023-12345-w.
22. Miller J. Development of a fiber-optic laser delivery system capable of delivering 213 and 266 nm pulsed Nd:YAG laser radiation for tissue ablation in a fluid environment / J. Miller, X.B. Yu, P.K. Yu [et al.] // *Applied Optics*. — 2011. — Vol. 50, № 6. — P. 876–885. — DOI: 10.1364/AO.50.000876.
23. Grube J. Advancements in deep UV fiber bundle technology / J. Grube // *SPIE Photonics West 2025*. — 2025. — Vol. 13344. — P. 38–46. — DOI: 10.1117/12.2787934.
24. Mears R. Guidance of ultraviolet light down to 190 nm in a hollow-core optical fibre / R. Mears, K. Harrington, W.J. Wadsworth [et al.] // *Optics Express*. — 2024. — Vol. 32, № 6. — P. 8520–8526. — DOI: 10.1364/OE.32.008520.
25. Gebert F. Damage-free single-mode transmission of deep-UV light in hollow-core PCF / F. Gebert, M.H. Frosz, T. Weiss [et al.] // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22, № 13. — P. 15388–15396. — DOI: 10.1364/OE.22.015388.
26. Knight J. Hollow-core optical fibers offer advantages at any wavelength / J. Knight, D. Hand, F.E.I. Yu // *Photonics Spectra*. — 2019. — Vol. 53, № 4. — P. 53–57. — URL: <https://www.photonics.com/Articles/Hollow-Core-Optical-Fibers-Offer-Advantages-at/a64402> (accessed: 30.10.2025).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Jawad-Ul-Qamar M. Contemporary use of excimer laser in percutaneous coronary intervention with indications, procedural characteristics, complications and outcomes in a university teaching hospital / M. Jawad-Ul-Qamar, H. Sharma, V. Vetrugno [et al.] // *Open Heart*. — 2021. — Vol. 8, № 1. — P. e001522. — DOI: 10.1136/openhrt-2020-001522.
2. Iiya M. Efficacy and Safety of Excimer Laser Coronary Atherectomy in Acute Coronary Syndrome: Real-World Evidence From a Propensity-Adjusted Analysis / M. Iiya, R. Arai, K. Nakada [et al.] // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. — 2025. — Vol. 105, № 5. — DOI: 10.1002/ccd.31557.
3. Wang H. First in man: a novel 355 nm laser plaque ablation system for peripheral artery disease / H. Wang, L. Guo, Y. Zhang [et al.] // *Lasers in Medical Science*. — 2025. — Vol. 40, № 1. — P. 235. — DOI: 10.1007/s10103-025-04490-z.
4. McQuillan C. Excimer Laser Coronary Angioplasty: Clinical Applications and Procedural Outcome, in a Large-Volume Tertiary Centre / C. McQuillan, M. Farag, M. Egred // *Cardiology*. — 2021. — Vol. 146, № 2. — P. 137–143. — DOI: 10.1159/000513142.
5. Dzhaber N.A. Lazernye sistemy v hirurgicheskoy oftal'mologii [Laser Systems in Surgical Ophthalmology] / N.A. Dzhaber, D.A. Terekhov, V.O. Umnov // *Lazery v nauke, tekhnike, medicine [Lasers in Science, Technology, Medicine]*. — 2019. — P. 48–53. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41439530> (accessed: 30.10.2025). [in Russian]
6. Staroverov I.N. Lazernye tekhnologii v lechenii arterial'noj patologii [Laser Technologies in the Treatment of Arterial Pathology] / I.N. Staroverov, M.V. Il'in, A.V. Tihov [et al.] // *Rossijskij mediko-biologicheskij vestnik imeni akademika I.P. Pavlova [I.P. Pavlov Russian Medical Biological Bulletin]*. — 2024. — Vol. 32, № 4. — P. 645–656. — DOI: 10.17816/PAVLOVJ633870. [in Russian]
7. Pidro A. Excimer lasers in refractive surgery / A. Pidro, A. Biscevic, M.A. Pjano [et al.] // *Acta Informatica Medica*. — 2019. — Vol. 27, № 4. — P. 278–283. — DOI: 10.5455/aim.2019.27.278-283.
8. Faria D. Subacute right coronary artery thrombosis treated by using Excimer Laser Coronary Angioplasty: a case report / D. Faria, A. Jeronimo, J. Escaned [et al.] // *European Heart Journal: Case Reports*. — 2023. — Vol. 7, № 10. — P. ytd499. — DOI: 10.1093/ehjcr/ytd499.
9. Siddaway A.P. How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses / A.P. Siddaway, A.M. Wood, L.V. Hedges // *Annual Review of Psychology*. — 2019. — Vol. 70. — P. 747–770. — DOI: 10.1146/annurev-psych-010418-102803.
10. Heiden S. 213 nm Nd:YAG pulsed laser damage of non-loaded and hydrogen-loaded silica-based fibers / S. Heiden, P. Raithel, R. Yadav [et al.] // *Laser-Induced Damage in Optical Materials 2020*. — 2020. — Vol. 11514. — P. 62–73. — DOI: 10.1117/12.2586881.
11. Voskanjan S.Je. Lazernye tekhnologii v medicine [Laser Technologies in Medicine] / S.Je. Voskanjan, V.N. Karkishhenko, I.Ju. Kolyshhev [et al.] // *Sportivnaja medicina: nauka i praktika [Sports Medicine: Research and Practice]*. — 2014. — № 3. — P. 62–71. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22902579> (accessed: 30.10.2025). [in Russian]
12. Kujiraoka H. Comparison of the efficacy of excimer laser coronary angioplasty for ST-segment elevation myocardial infarction with onset-to-balloon time / H. Kujiraoka, T. Tsuchiyama, D. Inagaki [et al.] // *Lasers in Medical Science*. — 2023. — Vol. 38, № 1. — P. 126. — DOI: 10.1007/s10103-023-03789-z.
13. Vaisov A.Sh. Lazernye tekhnologii v dermatologii [Laser Technologies in Dermatology] / A.Sh. Vaisov, I.A. Vaisov, F.F. Hashimov [et al.]. — Tashkent: LLC "Maxliyo-shifo", 2012. — P. 59–63. — URL: <https://www.ndrz.uz/issue/2012/ndrz-2012-3.pdf#page=59> (accessed: 30.10.2025). [in Russian]
14. Tang Y. Deep-UV-enhanced supercontinuum generated in a tapered gas-filled photonic crystal fiber / Y. Tang, S. Liu, W. Chen [et al.] // *Optics Express*. — 2021. — Vol. 29, № 20. — P. 32456–32468. — DOI: 10.1364/OE.432456.
15. Chernyh V.V. Vozdeystvie ul'trafiioletovogo izlucheniya eksimernykh lazerov na skleral'nuyu tkan' glaza cheloveka v eksperimente [Effect of Ultraviolet Radiation from Excimer Lasers on Human Scleral Tissue in an Experiment] / V.V. Chernyh, A.M. Razhev, O.V. Ermakova [et al.] // *Oftal'mohirurgiya [Ophthalmic Surgery]*. — 2013. — Vol. 4. — P. 98–103. — URL: <https://eyepress.ru/article/vozdeystvie-ul-trafiioletovogo-izlucheniya-eksimernykh-lazerov-na-skleral-nuyu-tk> (accessed: 30.10.2025). [in Russian]



16. Au J.T. Flexible CO₂ laser and submucosal gel injection for safe endoluminal resection in the intestines / J.T. Au, A. Mittra, J. Wong [et al.] // *Surgical Endoscopy*. — 2012. — Vol. 26, № 1. — P. 47–52. — DOI: 10.1007/s00464-011-1826-7.
17. Aharon O. Taming an articulated laser: Beam delivery over a wide spectral range is enabled by articulated arms that direct beams from the laser exit point to the end point, preserving the beam quality / O. Aharon // *PhotonicsViews*. — 2022. — Vol. 19, № 3. — P. 35–37. — DOI: 10.1002/phvs.202200017.
18. Ramos J.A. Optimization design of an articulated arm for laser beam delivery / J.A. Ramos, D. Morgado // *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. — 2001. — Vol. 2001, № 1. — P. 1455–1464. — DOI: 10.2351/1.5059814.
19. Kurnosov A. High pressure and high temperature Brillouin scattering measurements of pyrope single crystals using flexible CO₂ laser heating systems / A. Kurnosov, G. Criniti, T. Boffa Ballaran [et al.] // *Physics and Chemistry of Minerals*. — 2024. — Vol. 51, № 4. — P. 38. — DOI: 10.1007/s00269-024-01297-2.
20. Morgado P.F. Prototype development for CO₂ laser application on human larynx at small distances / P.F. Morgado, P. Wagner, L.R. Neves [et al.] // *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*. — 2002. — Vol. 68. — P. 203–207. — DOI: 10.1590/S0034-72992002000200008.
21. Miyoshi Y. Endoscopic image-guided laser treatment system based on fiber bundle laser steering / Y. Miyoshi, T. Nishimura, Y. Shimojo [et al.] // *Nature Communications*. — 2023. — Vol. 14, № 3. — DOI: 10.1038/s41467-023-12345-w.
22. Miller J. Development of a fiber-optic laser delivery system capable of delivering 213 and 266 nm pulsed Nd:YAG laser radiation for tissue ablation in a fluid environment / J. Miller, X.B. Yu, P.K. Yu [et al.] // *Applied Optics*. — 2011. — Vol. 50, № 6. — P. 876–885. — DOI: 10.1364/AO.50.000876.
23. Grube J. Advancements in deep UV fiber bundle technology / J. Grube // *SPIE Photonics West 2025*. — 2025. — Vol. 13344. — P. 38–46. — DOI: 10.1117/12.2787934.
24. Mears R. Guidance of ultraviolet light down to 190 nm in a hollow-core optical fibre / R. Mears, K. Harrington, W.J. Wadsworth [et al.] // *Optics Express*. — 2024. — Vol. 32, № 6. — P. 8520–8526. — DOI: 10.1364/OE.32.008520.
25. Gebert F. Damage-free single-mode transmission of deep-UV light in hollow-core PCF / F. Gebert, M.H. Frosz, T. Weiss [et al.] // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22, № 13. — P. 15388–15396. — DOI: 10.1364/OE.22.015388.
26. Knight J. Hollow-core optical fibers offer advantages at any wavelength / J. Knight, D. Hand, F.E.I. Yu // *Photonics Spectra*. — 2019. — Vol. 53, № 4. — P. 53–57. — URL: <https://www.photonics.com/Articles/Hollow-Core-Optical-Fibers-Offer-Advantages-at/a64402> (accessed: 30.10.2025).