

Юсеф Ю. Н., Петрачков Д. В., Коробов Е. Н.

РАЗВИТИЕ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ВИТРЕОРЕТИНАЛЬНОЙ ХИРУРГИИ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней», 119021, г. Москва

Представлен обзор научной литературы по развитию лазерных методов лечения в витреоретинальной хирургии. Применение фототерапии в медицине берет начало с древних времен, когда люди стали применять солнечный свет в лечении различных заболеваний. Расцвет фототерапии пришелся на вторую половину XIX в., что связано с изобретением первых электрических ламп. В 1960 г. Т. Мейман разработал первый в мире лазерный аппарат и совершил революцию в точности и контроле доставки светового луча. С этого момента началось развитие лазерной хирургии, в первую очередь в офтальмологии, которая мгновенно признала потенциал лазерного излучения. Последующее открытие аргонового лазера в 1964 г. американским ученым W. Bridges ознаменовало новую эру в фотокоагуляции сетчатки. Затем появились новые виды лазеров с различными системами доставки излучения, что существенно расширило спектр применения лазерных технологий в офтальмологии, в частности в витреоретинальной хирургии. В настоящее время они используются в окулопластике, рефракционной и роговичной хирургии, лазерном сопровождении факоэмульсификации катаракты, лечении глаукомы, лазеркоагуляции сетчатки, термотерапии. В витреоретинальной хирургии, которая совершенствуется с каждым десятилетием, лазерные технологии остаются на уровне XX столетия. Так, они по-прежнему применяются только для эндолазеркоагуляции сетчатки, несмотря на то что существует огромный потенциал использования лазеров в качестве «лазерного скальпеля» для удаления стекловидного тела, эпиретинального фиброза, прецизионного удаления с поверхности сетчатки шварт, а также ретиномии и хориоидотомии.

Ключевые слова: витреоретинальная хирургия; витрэктомия; лазерная витрэктомия; Nd:YAG-лазер; Er:YAG-лазер; CO₂-лазер; средний инфракрасный диапазон спектра; лазерная абляция; прецизионная хирургия.

Для цитирования: Юсеф Ю. Н., Петрачков Д. В., Коробов Е. Н. Развитие лазерных технологий в витреоретинальной хирургии (обзор литературы). Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2023;31(2):210—214. DOI: <http://dx.doi.org/10.32687/0869-866X-2023-31-2-210-214>

Для корреспонденции: Коробов Егор Николаевич, канд. мед. наук, младший научный сотрудник отдела инновационных витреоретинальных технологий ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней», e-mail: egorkorobov1991@mail.ru

Yusef Yu. N., Petrachkov D. V., Korobov E. N.

THE DEVELOPMENT OF LASER TECHNOLOGIES IN VITREORETINAL SURGERY (PUBLICATIONS REVIEW)

The Federal State Budget Scientific Institution "The Research Institute of Eye Diseases", 119021, Moscow, Russia

The article presents review of scientific publications on development of laser treatment methods in vitreoretinal surgery. The use of photo-therapy in medicine dates back to ancient times, when people began to use sunlight as treatment of various diseases. The heyday of photo-therapy falls on the second half of the XIX century, which was associated with the invention of first electric lamps. In 1960, T. Maiman developed the world's first laser, revolutionizing precision and control of light delivery. This was the beginning of heyday of laser surgery primarily in ophthalmology, where potential of lasers was instantly recognized. The subsequent discovery of argon laser in 1964 by W. Bridges (USA) marked new era in retinal photo-coagulation. Then new types of lasers with various systems of delivering laser radiation appeared that significantly expanded range of application of laser technologies in ophthalmology and vitreoretinal surgery. Currently, the lasers are applied in oculoplasty, refractive and corneal surgery, in laser support of phacoemulsification of cataract, in treatment of glaucoma, in laser coagulation of retina and thermotherapy. In vitreoretinal surgery laser technologies remain at the level of the XX century. Thus, they are still applied only for endolaser coagulation of retina. And this despite the fact that there is immense potential for applying lasers as "laser scalp" to remove vitreous humor, epiretinal fibrosis, retinotomy and choroidotomy.

Keywords: vitreoretinal surgery; vitrectomy; laser vitrectomy; Nd:YAG laser; Er:YAG laser; CO₂ laser; mid-infrared spectrum; laser ablation; precision surgery.

For citation: Yusef Yu. N., Petrachkov D. V., Korobov E. N. The development of laser technologies in vitreoretinal surgery (publications review). *Problemi socialnoi gigieni, zdravookhraneniya i istorii meditsiny*. 2023;31(2):210—214 (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.32687/0869-866X-2023-31-2-210-214>

For correspondence: Korobov E. N., candidate of medical sciences, the Junior Researcher of the Department of Innovative Vitreoretinal Technologies of the Federal State Budget Scientific Institution "The Research Institute of Eye Diseases". e-mail: egorkorobov1991@mail.ru

Conflict of interests. The authors declare absence of conflict of interests.

Acknowledgment. The study had no sponsor support

Received 10.05.2022

Accepted 29.10.2022

Фототерапия в медицине применялась с древних времен, когда люди стали использовать солнечный свет в качестве лечения различных заболеваний. Расцвет ее пришелся на вторую половину XIX в. и был связан с изобретением советскими

учеными в 1874—1876 гг. первых электрических ламп.

Концепция глазной фототерапии впервые предложена немецкими офтальмологами в первой половине XX в. для лечения пациентов с меланомой хо-

Здоровье и общество

риоидеи с помощью сфокусированного солнечного света. Поскольку этот метод был непрактичным, выбор пал на искусственные источники освещения. В последующем был создан первый ксеноновый дуговой фотокоагулятор, который был эффективен для коагуляции разрывов сетчатки и лечения внутриглазных опухолей. Однако было трудно сфокусировать луч на маленьком участке, лечение требовало длительных экспозиций и часто сопровождалось выраженными болевыми ощущениями. Данный метод приводил также к серьезным осложнениям: помутнению роговицы, катаракте, хориоретиниту, нейрохориоретиниту. Вышеперечисленное послужило поводом для дальнейшего поиска и совершенствования технологий лазерной хирургии.

В начале второй половины XX столетия американскими учеными разработан первый в мире лазер на основе кристалла рубина. Это произвело революцию в точности и контроле доставки света к структурам глаза из-за нескольких ключевых отличий от некогерентных источников света:

- фотоны испускаются в одной фазе (следовательно, когерентны);
- диапазон длин волн крайне узок, что делает его монохроматическим светом;
- луч имеет узкую угловую направленность (хорошо коллимирован), следовательно, позволяет создать в малом пятне большие плотности энергии (сфокусирован).

Признание потенциала лазера в офтальмологии было почти мгновенным: первые данные о воздействии рубиновым лазером на ткани глаза были опубликованы М. Zaret и соавт. в 1961 г. [1]. Результаты применения рубинового лазера (длина волны 694 нм) были впечатляющими, однако они вызвали ряд опасений, связанных с осложнениями: ожоги сетчатки и хориоидеи были выраженными и, поскольку длина волны темно-красного цвета (694 нм) плохо поглощается меланином и кровью, коагуляция сосудов происходила с выраженными кровоизлияниями и интенсивным рубцеванием тканей. Аналогичные результаты были получены при фотокоагуляции радужки [1].

Открытие аргонного лазера вслед за рубиновым ознаменовало новую эру в фотокоагуляции сетчатки. Данный лазер работал в диапазоне синих (488 нм) и зеленых (514 нм) длин волн, которые сильно поглощаются гемоглобином и меланином, что дает огромное преимущество по сравнению с рубиновым лазером. Вскоре F. L'Esperance в 1968 г. начал исследования по применению аргонного лазера на сетчатке глаза с несколькими системами доставки, включая биомикроскопию [2]. Дальнейший прогресс был достигнут, когда лазер присоединили к щелевой лампе: это позволило получить прицельный луч с точным управлением размера пятна, его местоположением, а также мощностью и продолжительностью экспозиции. Такая система доставки обеспечивала эффективную фотокоагуляцию при более широком спектре заболеваний сетчатки — от небольших сосудистых поражений и различных ма-

кулопатий до выраженных пролиферативных изменений при диабетической ретинопатии.

Исследование Diabetic Retinopathy Study (DRS) 1971—1975 гг. и многоцентровое исследование Early Treatment Diabetic Retinopathy Study (ETDRS) [3] стали крупными рандомизированными клиническими испытаниями, которые продемонстрировали положительный эффект лазерной фотокоагуляции сетчатки при диабетической ретинопатии. В исследовании DRS показано, что аргонный лазер так же эффективен, как и ксеноновый, но дает меньше побочных эффектов.

Возможность воздействия на трабекулярную сеть и радужную оболочку расширила диапазон применения аргонного лазера в офтальмологии. В 1970-е годы были введены аргонная лазерная трабекулопластика и иридэктомия. Серия клинических работ в 1971 г. свидетельствовала о распространении и принятии аргонной лазерной технологии [4], которая в различных вариациях оставалась основой для клинической фототерапии в течение следующих нескольких десятков лет. Следует подчеркнуть, что основоположником современных методов лазерной микрохирургии глаза является советский офтальмолог академик РАМН СССР М. М. Краснов [5].

В 70-е годы XX в. с появлением иттрий-алюминиево-гранатового лазера (Nd:YAG) с длиной волны 1064 нм стало возможным проведение лазерной дисцизии вторичной катаракты и иридэктомии. Специфических хромофоров с высоким коэффициентом поглощения на данной длине волны не существует, однако при ней излучение может глубоко проникать в ткани с минимальными потерями на поглощение и рассеивание. Позднее появились лазеры Nd:YAG с удвоенной (532 нм) частотой длины волны с воздушным охлаждением, которые заменили аргонные лазеры с водяным охлаждением, поскольку обладали преимуществом — отсутствием в спектре излучения синей составляющей. Лазер с длиной волны 532 нм имеет высокую степень поглощения меланином клеток пигментного эпителия сетчатки и гемоглобином, что дает возможность проводить коагуляцию сосудов сетчатки или радужной оболочки. Это существенно расширило показания и позволило проводить лечение Nd:YAG-лазером с удвоенной частотой волны в качестве лазеркоагуляции сетчатки при сахарном диабете, периферических дистрофиях и разрывах сетчатки, окклюзии вен сетчатки.

Дальнейшее развитие лазерных технологий связано с появлением лазеров на красителях. Конструкция таких лазеров аналогична импульсному твердотельному лазеру, в котором лазерный кристалл заменен ячейкой с красителем. Лазеры на красителях обычно могут использоваться для значительно более широкого диапазона длин волн. Твердотельные лазеры имели преимущество в том, что были менее дорогостоящими и портативными. Это позволило комбинировать их с другими хирургическими операционными системами.

Системы доставки лазерного излучения. Широкое распространение лазерных технологий в офтальмологии было бы невозможным без системы лазерной доставки. Способ доставки — ключевой аспект лазерной фототерапии. В то время как рубиновый лазер был присоединен к монокулярному прямому офтальмоскопу, последующие поколения лазеров стали присоединять к непрямому офтальмоскопу, щелевой лампе и операционному микроскопу. Сочетание лазеров с щелевой лампой улучшило доставку лазерного излучения, особенно к заднему полюсу глаза, что позволило проводить лечение широкого спектра заболеваний сетчатки и хориоидеи в амбулаторных условиях.

С появлением оптоволоконной стала развиваться эндолазерная фотокоагуляция, при которой лазерный луч доставляется зондом, помещенным в витреальную полость, непосредственно к внутренним оболочкам глаза. Данная технология существенно сократила время лечения и улучшила результаты витреоретинальной хирургии.

«Лазерный скальпель». Понятия «лазерный скальпель» и «лазерный нож» напрямую связаны с изобретением в 1964 г. С. К. Patel углекислотного лазера (CO₂-лазер) [6], получившего широкое распространение за счет высокоэнергетического лазерного излучения в первую очередь в промышленности и только потом в медицине. CO₂-лазер (длина волны 10,6 мкм) активно используется в хирургической практике в силу характерных особенностей заживления ран после воздействия лазерного излучения. Заключаются они в сокращении экссудативной фазы воспаления, раннем формировании грануляционной ткани, отсутствии грубой рубцовой ткани на месте воздействия. Все вышеуказанное послужило морфологическим обоснованием широкого применения CO₂-лазера в различных областях хирургии. В последнее время наиболее активно данный лазер применяется в гинекологии, стоматологии, дерматовенерологии, эндоскопической хирургии. В офтальмологии CO₂-лазер применяется в окулопластике, офтальмоонкологии при операциях по удалению доброкачественных и злокачественных новообразований век и конъюнктивы. В силу высокой прецизионности, коагуляционной способности при низком термическом поражении края раны, а также абсолютной стерильности CO₂-лазер применяется при антиглаукомных операциях, в частности при непроникающей глубокой склерэктомии и ее различных модификациях.

В качестве «лазерного скальпеля» в офтальмологии также применяется Nd:YAG-лазер. Наиболее широкое применение данный лазер получил при иридотомии и дисцизии вторичной катаракты. С 1980-х годов Nd:YAG-лазер с переменным успехом применяется для лечения заднего отрезка глаза. В литературе имеются статьи по использованию данного лазера для рассечения витреоретинальных шварт при диабетической ретинопатии, ретинонии клапанных разрывов, для лечения субгиалоидных кровоизлияний, окклюзии центральной арте-

рии сетчатки, серповидноклеточной ретинопатии, регматогенной отслойки сетчатки [7]. В 1993 г. W. F. Tsai и соавт. впервые применили Nd:YAG-лазер для лечения плавающих помутнений стекловидного тела [8]. Данная процедура получила название витреолизиса, в последние годы она значительно популяризируется, поскольку неинвазивна и относительно недорога.

В настоящее время наиболее широкое распространение в офтальмологии в качестве «лазерного скальпеля» получил ультрафиолетовый (УФ) эксимерный лазер. Его применение в рефракционной хирургии произошло случайным образом в 1980 г. ученым R. Srinivasan при испытании воздействия на различные органические материалы недавно разработанного эксимерного лазера с длиной волны 193 нм [9]. S. Trokel и F. L'Esperance в 1983 г. впервые применили данный лазер вместо скальпеля при кератотомии, а в последующем стали использовать его при фоторефрактивной кератэктомии [10].

Еще одним революционным шагом в рефракционной хирургии стала разработка фемтосекундного лазера для разрезания локуса роговицы, впервые примененная группой Tibor Juhasz's в 1998 г. [11]. Его практическое применение возможно только для переднего отрезка глаза: в рефракционной, роговичной хирургии (удаление лентикул, формирование карманов для интрастромальных колец, пересадка роговицы в различных ее вариантах) и для фемтосопровождения ультразвуковой факоэмульсификации катаракты (формирование парацентезов и основного разреза в роговице, капсулорексис, дробление ядра на фрагменты). Однако M. Merker и соавт. в 2013 г. опубликовали результаты исследования, в котором с помощью контактной линзы без проникновения в полость глаза осуществляли воздействие фемтосекундного лазера на стекловидное тело. Согласно полученным результатам, оказалось возможным добиться резов стекловидного тела, но существует большой риск повреждения сетчатки [12].

Все вышеуказанные лазеры, работающие по принципу «лазерного скальпеля», несмотря на хорошие показатели по рассечению тканей глаза, не получили применения в витреоретинальной хирургии по причине отсутствия системы доставки излучения к заднему полюсу глаза и отсутствия системы его фокусировки в пятно малого диаметра, которая должна обеспечивать прецизионное, селективное рассечение тканей с разрешением порядка 10—100 мкм.

«Лазерный скальпель» в витреоретинальной хирургии. Одним из кандидатов, претендующих на роль «лазерного скальпеля» в витреоретинальной хирургии, является УФ-лазер, такой как эксимерный лазер на фториде аргона (ArF) с длиной волны 193 нм и Nd:YAG-лазер с 5-й гармоникой с длиной волны 213 нм. Сообщалось, что эксимерный лазер ArF с длиной волны 193 нм может обеспечить точное и воспроизводимое разрезание мембранной ткани в жидкой среде глаза у животных и человека [13].

Здоровье и общество

В 2007 г. S. Schastak и соавт. [14] разработали гибкий полый волновод, покрытый изнутри алюминием и подключенный к одноразовому наконечнику 20 G, для доставки УФ-лазера к заднему сегменту глаза и оценили возможность использования этой новой системы доставки для витреоретинальной хирургии. Согласно результатам исследования, рассечение сетчатки было возможно только при контактной технике, так как в противном случае энергия лазерного излучения полностью поглощалась тонкой пленкой жидкости между кончиком «скальпеля» и тканью [14].

Еще одним из основных кандидатов, претендующих на роль «лазерного скальпеля» в витреоретинальной хирургии, является среднеинфракрасный лазер на эрбий-иттрий-алюминиевом гранате (Er:YAG). Преимущество этой длины волны, равной 2,94 мкм, в том, что она соответствует пику поглощения воды. Первые попытки применения данного лазера для заднего отрезка глаза были проведены на экспериментальной модели. В 1989 г. T. Margolis и соавт. испытали Er:YAG-лазер на экспериментальных тяжах стекловидного тела [15].

В 1994 г. D. D'Amico и соавт. впервые провели испытание данного лазера на сетчатке энуклеированных глаз кроликов, а уже в 1996 г. опубликовали результаты многоцентрового клинического исследования, в котором приняли участие пациенты, перенесшие витреоретинальную операцию с использованием Er:YAG-лазера, оснащенного гибким волоконно-оптическим кабелем со сменными эндозондами 20 G. Авторы пришли к заключению, что Er:YAG-лазер позволяет проводить точное разрезание тканей и абляцию при витреоретинальных хирургических вмешательствах с высокой степенью безопасности. Основным ограничением данной методики являлось образование пузырьков воздуха вследствие испарения воды, что существенно затрудняло визуализацию рабочей зоны и приводило к неисправности зонда из-за образования накали на его поверхности [16].

Чтобы преодолеть эти проблемы и сделать Er:YAG-лазер полезным инструментом для хирургии стекловидного тела, он был объединен с системой инфузии и аспирации для более эффективного выполнения хирургических вмешательств на стекловидном теле. Эта Er:YAG-лазерная система была протестирована с использованием техники «открытое небо» в экспериментах на животных M. Mroch и соавт. [17].

В серии экспериментов на свиных и кадаверных глазах (неопубликованные данные 1996 г.) S. Binder и соавт. выполнили открытую и закрытую витректомию, рассечение мембран, ретиноматию и ретинэктомию, чтобы определить параметры хирургии на стекловидном теле и изучить коагуляционный эффект на сетчатку и сосуды сетчатки.

Витректомию с использованием лазера получила название фотовитректомию. M. Krause и D. D'Amico также экспериментально подтвердили, что скорость абляции стекловидного тела увеличивалась линейно

с частотой повторения импульсов и нелинейно с энергией импульса [18]. В 2000 г. S. Binder и соавт. опубликовали результаты клинического применения Er:YAG-лазерной системы для фотовитректомию. Авторы пришли к выводу, что Er:YAG-лазер в сочетании с инфузионной системой является перспективной технологией для витреоретинальной хирургии [19]. Для дальнейшего развития этой системы необходимы модификации концевой наконечника.

В 2014 г. T. Hutchens и соавт. разработали сменный эндозонд из оксида германия и диоксида кремния на основе полого волновода, в конец которого поместили пять сапфировых микросфер, что позволило получить фокус лазерного излучения непосредственно на конце эндозонда с самоограничивающейся глубиной абляции от 10 до 20 мкм. Дополнительно авторы интегрировали в лазерный зонд освещение, что позволило лучше визуализировать зону манипуляций [20].

Заключение

Обзор литературы показал, что непрерывный прогресс в понимании взаимодействия лазера и биологической ткани и современные достижения в лазерных технологиях вместе с открытием различных путей реакции тканей продолжают повышать точность и избирательность глазной лазерной терапии и хирургии и позволяют разрабатывать новые стратегии лечения. Для витреоретинальной хирургии необходим лазер, который позволит проводить оперативные вмешательства на заднем отрезке глаза с высокой точностью манипуляций: удаление шварт, эпиретинальных мембран без повреждения сетчатки. Это существенно уменьшит риски интра- и послеоперационных осложнений, а также улучшит анатомические и функциональные результаты. На сегодняшний день разработано несколько лазерных систем, работающих по принципу «лазерного скальпеля». Наиболее перспективной из них является Er:YAG-лазер, однако существует ряд проблем, которые необходимо устранить или найти им альтернативное решение. К ним относятся пузыреобразование при работе лазера в водной среде, нагревание тканей, неконтролируемая глубина реза, отсутствие системы доставки лазерного излучения к сетчатке, соответствующие калибрам инструментов современной витреоретинальной хирургии 25—27 G. Необходимы дальнейшие исследования и экспериментальные разработки в данном направлении, которое имеет колоссальный потенциал. Возможно, в ближайшем будущем будет найдена подходящая длина волны лазерного излучения с последующей разработкой «лазерного скальпеля», который будет успешно применяться в витреоретинальной хирургии. При дальнейшем развитии этот новый подход к лазерной абляции тканей глаза может стать альтернативой механическим инструментам для хирургического рассечения и удаления патологических тканей с поверхности сетчатки.

Исследование не имело спонсорской поддержки.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

um:YAG laser. *J. Biomed. Opt.* 2014;19(1):18003. doi: 10.1117/1.JBO.19.1.018003

Поступила 10.05.2022
Принята в печать 29.10.2022

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

- Zaret M. M., Breinin G. M., Schmidt H. Ocular lesions produced by an optical maser (laser). *Science*. 1961;134:1525—6. doi: 10.1126/science.134.3489.1525
- L'Esperance F. A. The treatment of ophthalmic vascular disease by argon laser photocoagulation. *Trans. Am. Acad. Ophthalmol. Otolaryngol.* 1969;73:1077—96.
- Early Treatment Diabetic Retinopathy Study Research Group. Early photocoagulation for diabetic retinopathy. ETDRS report number 9. *Ophthalmology*. 1991;98(5):766—85. doi: 10.1016/S0161-6420(13)38011-7
- Pomerantzeff O., Lee P. F., Hamada S. Clinical importance of wavelengths in photocoagulation. *Trans. Am. Acad. Ophthalmol. Otolaryngol.* 1971;75(3):557—68.
- Краснов М. М., Сапрыкин П. И., Доронин П. П. Электронно-микроскопическое изучение тканей глазного дна при лазерной коагуляции. *Вестник офтальмологии*. 1973;(2):13—5.
- Patel C. K. N. Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂. *Phys. Rev. J. Arch.* 1964;136(5):1187—93. doi: 10.1103/PhysRev.136.A1187
- Шаимова В. А., Шаимов Т. Б., Бойко Э. В. Отдаленные результаты профилактического лазерного лечения тракционных симптоматических клапанных разрывов сетчатки. *Вестник офтальмологии*. 2020;136(3):32—8. doi: 10.17116/oftalma202013603132
- Tsai W. F., Chen Y. C., Su C. Y. Treatment of vitreous floaters with neodymium YAG laser. *Br. J. Ophthalmol.* 1993;(77):485—8. doi: 10.1136/bjo.77.8.485
- Srinivasan R., Wynne J. J., Blum S. E. Far-UV photoetching of organic material. *Laser Focus*. 1983; May:62—6.
- Trokel S. L., Srinivasan R., Braren B. Excimer laser-surgery of the cornea. *Am. J. Ophthalmol.* 1983;96:710—5. doi: 10.1016/s0002-9394(14)71911-7
- Kurtz R. M., Horvath C., Liu H. H. Lamellar refractive surgery with scanned intrastromal picosecond and femtosecond laser pulses in animal eyes. *J. Refract. Surg.* 1998;14:541—8.
- Merker M., Ackermann R., Kammel R. An In Vitro Study on Focusing fs-Laser Pulses Into Ocular Media for Ophthalmic Surgery. *Lasers Surg Med.* 2013;45(9):589—96. doi: 10.1002/lsm.22179
- Hemo I., Palanker D., Turovets I. Vitreoretinal surgery assisted by the 193-nm excimer laser. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 1997;38:1825—9.
- Schastak S., Yafai Y., Yasukawa T. Flexible UV Light Guiding System for Intraocular Laser Microsurgery. *Lasers Surg. Med.* 2007;39(4):353—7. doi: 10.1002/lsm.20480
- Margolis T. I., Farnath D. A., Destro M. Erbium-YAG laser surgery on experimental vitreous membranes. *Arch. Ophthalmol.* 1989;107(3):424—8. doi: 10.1001/archoph.1989.01070010434040
- D'Amico D. J., Blumenkranz M. S., Lavin M. J. Multicenter Clinical Experience Using an Erbium:YAG Laser for Vitreoretinal Surgery. *Ophthalmology*. 1996;103(10):1575—85. doi: 10.1016/s0161-6420(96)30460-0
- Mrochen M., Petersen H., Wüllner C. H. Experimental results of erbium:YAG laser vitrectomy. *Klin. Monbl. Augenheilkd.* 1998;212(1):50—4. doi: 10.1055/s-2008-1034831
- Krause M. H., D'Amico D. J. Ablation of vitreous tissue with a high repetition rate erbium:YAG laser. *Eur. J. Ophthalmol.* 2003;13(5):424—32. doi: 10.1177/112067210301300502
- Binder S., Stolba U., Kellner L. Erbium:YAG Laser Vitrectomy: Clinical Results. *Am. J. Ophthalmol.* 2000;130(1):82—6. doi: 10.1016/s0002-9394(00)00399-8
- Hutchens T. C., Darafsheh A., Fardad A. Detachable microsphere scalp tips for potential use in ophthalmic surgery with the erbium:YAG laser. *J. Biomed. Opt.* 2014;19(1):18003. doi: 10.1117/1.JBO.19.1.018003
- Zaret M. M., Breinin G. M., Schmidt H. Ocular lesions produced by an optical maser (laser). *Science*. 1961;134:1525—6. doi: 10.1126/science.134.3489.1525
- L'Esperance F. A. The treatment of ophthalmic vascular disease by argon laser photocoagulation. *Trans. Am. Acad. Ophthalmol. Otolaryngol.* 1969;73:1077—96.
- Early Treatment Diabetic Retinopathy Study Research Group. Early photocoagulation for diabetic retinopathy. ETDRS report number 9. *Ophthalmology*. 1991;98(5):766—85. doi: 10.1016/S0161-6420(13)38011-7
- Pomerantzeff O., Lee P. F., Hamada S. Clinical importance of wavelengths in photocoagulation. *Trans. Am. Acad. Ophthalmol. Otolaryngol.* 1971;75(3):557—68.
- Krasnov M. M., Saprykin P. I., Doronin P. P. Electron microscopic study of fundus tissues during laser coagulation. *Vestnik oftalmologii*. 1973;89(2):13—5 (in Russian).
- Patel C. K. N. Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂. *Phys. Rev. J. Arch.* 1964;136(5):1187—93. doi: 10.1103/PhysRev.136.A1187
- Shaimova V. A., Shaimov T. B., Boiko E. V. Long-term results of prophylactic laser treatment of symptomatic traction retinal valvular ruptures. *Vestnik oftalmologii*. 2020;136(3):32—8. doi: 10.17116/oftalma202013603132 (in Russian.)
- Tsai W. F., Chen Y. C., Su C. Y. Treatment of vitreous floaters with neodymium YAG laser. *Br. J. Ophthalmol.* 1993;(77):485—8. doi: 10.1136/bjo.77.8.485
- Srinivasan R., Wynne J. J., Blum S. E. Far-UV photoetching of organic material. *Laser Focus*. 1983; May:62—6.
- Trokel S. L., Srinivasan R., Braren B. Excimer laser-surgery of the cornea. *Am. J. Ophthalmol.* 1983;96:710—5. doi: 10.1016/s0002-9394(14)71911-7
- Kurtz R. M., Horvath C., Liu H. H. Lamellar refractive surgery with scanned intrastromal picosecond and femtosecond laser pulses in animal eyes. *J. Refract. Surg.* 1998;14:541—8.
- Merker M., Ackermann R., Kammel R. An In Vitro Study on Focusing fs-Laser Pulses Into Ocular Media for Ophthalmic Surgery. *Lasers Surg Med.* 2013;45(9):589—96. doi: 10.1002/lsm.22179
- Hemo I., Palanker D., Turovets I. Vitreoretinal surgery assisted by the 193-nm excimer laser. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 1997;38:1825—9.
- Schastak S., Yafai Y., Yasukawa T. Flexible UV Light Guiding System for Intraocular Laser Microsurgery. *Lasers Surg. Med.* 2007;39(4):353—7. doi: 10.1002/lsm.20480
- Margolis T. I., Farnath D. A., Destro M. Erbium-YAG laser surgery on experimental vitreous membranes. *Arch. Ophthalmol.* 1989;107(3):424—8. doi: 10.1001/archoph.1989.01070010434040
- D'Amico D. J., Blumenkranz M. S., Lavin M. J. Multicenter Clinical Experience Using an Erbium:YAG Laser for Vitreoretinal Surgery. *Ophthalmology*. 1996;103(10):1575—85. doi: 10.1016/s0161-6420(96)30460-0
- Mrochen M., Petersen H., Wüllner C. H. Experimental results of erbium:YAG laser vitrectomy. *Klin. Monbl. Augenheilkd.* 1998;212(1):50—4. doi: 10.1055/s-2008-1034831
- Krause M. H., D'Amico D. J. Ablation of vitreous tissue with a high repetition rate erbium:YAG laser. *Eur. J. Ophthalmol.* 2003;13(5):424—32. doi: 10.1177/112067210301300502
- Binder S., Stolba U., Kellner L. Erbium:YAG Laser Vitrectomy: Clinical Results. *Am. J. Ophthalmol.* 2000;130(1):82—6. doi: 10.1016/s0002-9394(00)00399-8
- Hutchens T. C., Darafsheh A., Fardad A. Detachable microsphere scalp tips for potential use in ophthalmic surgery with the erbium:YAG laser. *J. Biomed. Opt.* 2014;19(1):18003. doi: 10.1117/1.JBO.19.1.018003