

УДК: 617-089: 615.849.19

DOI: 10.37895/2071-8004-2024-28-4-35-41

Тип статьи: Обзор

ОСОБЕННОСТИ ЗАЖИВЛЕНИЯ РАН, НАНЕСЕННЫХ ЛУЧОМ CO₂-ЛАЗЕРА. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Н.А. Данилин¹, И.В. Курдяев¹, В.А. Дербенев¹, И.Г. Мариничева²¹ ФГБУ «Научно-практический центр лазерной медицины им. О.К. Скобелкина» ФМБА России, Москва, Россия² ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва, Россия

Резюме

В статье представлен обзор данных зарубежной и отечественной литературы касательно особенностей течения раневого процесса в лазерной кожной ране на основании морфологических и функциональных исследований. Изучение зарубежного и отечественного опыта позволяет определить оптимальные параметры лечебного воздействия лазерного излучения на кожу.

Ключевые слова: лазерное излучение, микроциркуляция, репаративные процессы в тканях, ревааскуляризация

Для цитирования: Данилин Н.А., Курдяев И.В., Дербенев В.А., Мариничева И.Г. Особенности заживления ран, нанесенных лучом CO₂-лазера. Обзор литературы. *Лазерная медицина*. 2024; 28(4):35–41. <https://doi.org/10.37895/2071-8004-2024-28-4-35-41>

Контакты: Данилин Н.А., e-mail: danilin_nikolai@mail.ru

HEALING OF THE WOUND CAUSED BY CO₂-LASER BEAM. A LITERATURE REVIEW

Danilin N.A.¹, Kurdyayev I.V.¹, Derbenev V.A.¹, Marinicheva I.G.²¹ Skobelkin State Scientific Center for Laser Medicine, FMBA of Russia, Moscow, Russia² Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

Abstract

The article presents a review and the analysis of data found in the foreign and domestic literature on features of wound healing in laser skin wounds using morphological and functional test findings. Assessment of foreign and domestic experience allows to define optimal parameters for better therapeutic effect of laser light irradiation of the skin.

Keywords: laser radiation, microcirculation, reparative processes in tissues, revascularization

For citation: Danilin N.A., Kurdyayev I.V., Derbenev V.A., Marinicheva I.G. Healing of the wound caused by CO₂-laser light. A literature review. *Laser Medicine*. 2024; 28(4):35–41. [In Russ.]. <https://doi.org/10.37895/2071-8004-2024-28-4-35-41>

Contacts: Danilin N.A., e-mail: danilin_nikolai@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Исследования взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями и поиск оптимальных возможностей использования лазеров в медицине длятся уже более 50 лет. В связи с постоянным поступательным движением науки вперед накопленные знания в этой области периодически пополняются новыми данными. Результаты разработок многих исследователей как у нас в стране, так и за рубежом показали универсальные возможности лазерного излучения, используемого в медицине, в частности в хирургии. Операции, выполняемые с использованием лазерного скальпеля, стерильны, протекают бескровно с большой точностью и минимальной травматизацией тканей. Все это, конечно, привлекает внимание хирургов многих специальностей.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

Вместе с тем, обобщая экспериментальные и клинические данные об использовании лазерного излучения в хирургии, наряду с положительными

свойствами находим и некоторые отрицательные эффекты. По анализу литературных данных, да и по собственному опыту очевидно, что спектр мнений о достоинствах и недостатках лазерной хирургии колеблется от восторженных до резко негативных. В большей степени это связано с различными оценками течения репаративных процессов в тканях после воздействия лазерного излучения. Поэтому все исследования, направленные на изучение взаимодействия лазерного излучения с биологическими тканями, продолжаются для полного установления четких границ возможности их клинического применения [1, 2, 3, 4].

Сравнивая взаимодействие луча любой лазерной установки с биологическими тканями, необходимо помнить, что оно существенно отличается от воздействия традиционных хирургических инструментов. Кратерообразный дефект после однократного точечного воздействия, например на кожу, объясняется структурой лазерного луча, так как его плотность мощности не является однородной. В центре луча располагается жгут с наиболее высоким уровнем

энергии, которая концентрически уменьшается к его периферии. Поэтому лазерный луч даже при самой высокой степени фокусировки, рассекая ткань, оставляет полосу коагулированных краев раны. Так происходит, во-первых, за счет термического повреждения кожи рассеивающим теплом из центральной зоны лазерного луча, энергия которой идет на испарение ткани; и во-вторых, за счет воздействия периферической части луча, мощности которой недостаточно для испарения ткани (из-за уменьшения ее от центра к периферии и отражения от наклонных стенок кратера формирующейся раны [5]. На рисунках 1 и 2 а, 2 б, 2 в показано, как д-р Т. Оширо схематически изображает воздействие CO_2 , АИГ и аргонного лазеров на биоткань при размере пятна в 1 мм, выходной мощности в 6 Вт и времени экспозиции в 1 сек.

Нежелательные эффекты лазерного воздействия на ткань, которые заключаются в замедленном

заживлении ран, в основном связаны с тепловым повреждением клеток. Однако следует заметить, что высокая температура луча является лишь следствием взаимодействия светового потока (в видимом или невидимом диапазоне спектра) с биологическим объектом, и влияние лазерного светового потока различных установок и мощностей на тканевые и клеточные структуры требует своих отдельных исследований.

В одной из первых работ [6], посвященных заживлению ран, нанесенных CO_2 -лазером, показаны различия в течении раневого процесса в коже и мышце. Более плотная и содержащая меньше жидкости кожа сильнее повреждается лучом лазера, чем мышца. На основании проведенного исследования сделан вывод, который в дальнейшем получил подтверждение о том, что использовать лазерный скальпель для рассечения кожи нецелесообразно. И эта точка зрения сохранялась довольно долго, около 8–10 лет.

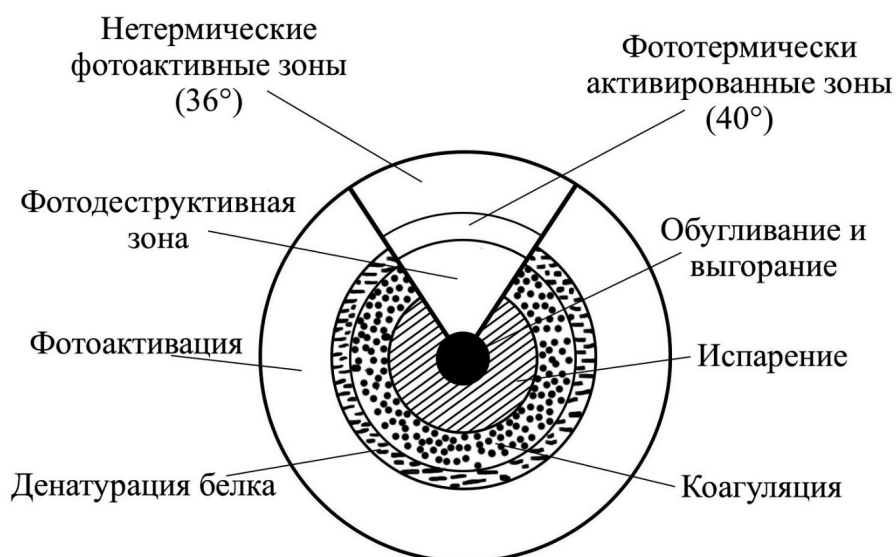


Рис. 1. Одновременное биологическое воздействие лазерного пучка при испарении ткани

Fig. 1. Simultaneous biological effects of laser beam during tissue evaporation

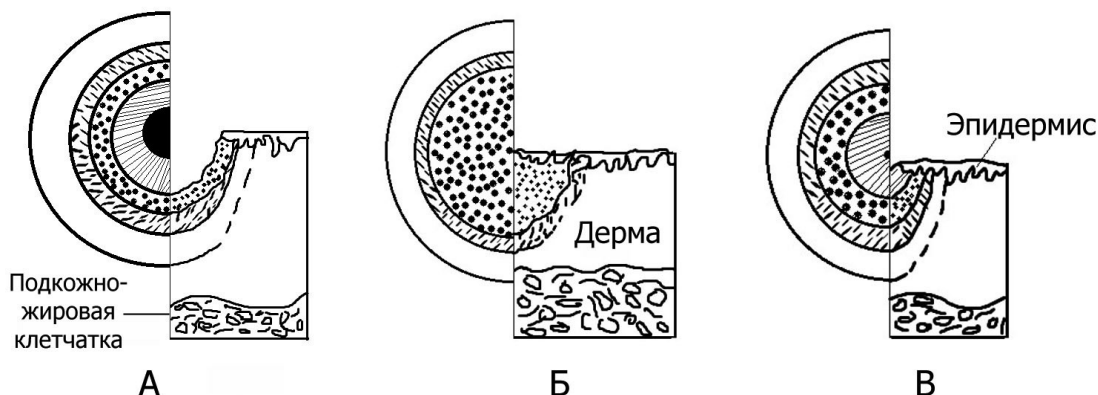


Рис. 2. Схематическое изображение и реальная картина воздействия луча: А – CO_2 , Б – АИГ, В – аргонного лазера при размере пятна 1 мм выходной мощности 6 Вт с временем экспозиции 1 сек

Fig. 2. Schematic representation and the real picture of laser beam impacts: А – CO_2 , Б – AIG, В – argon lasers with spot size 1 mm, output power 6 W, exposure 1 sec

Вместе с тем объяснить только термическим повреждением замедление заживления лазерных ран кожи нельзя, так как это не вполне отражает механизмы восстановительных процессов в ранах, да и уровень развития лазерной техники в тот период был еще недостаточно высок.

В сравнительном исследовании заживления кожи свиньи после разрезов СО₂-лазером и скальпелем отмечено отсутствие различий в восстановительном процессе в обеих группах в ранние сроки наблюдений. Также было замечено относительно медленное образование коллагена и удлинение фазы миграции эпителия к краям лазерных ран [7, 8].

Применение СО₂-лазера для рассечения кожи в большинстве экспериментальных работ показало, что тензометрические данные таких ран ниже, чем у нанесенных скальпелем, особенно в ранние сроки после вмешательства [9, 10, 11, 12]. В своем исследовании Finestrnbush (1982) тем не менее показывает, что разрезы лазерных ран в процессе заживления прочнее скальпельных вплоть до третьей недели. Это различие в оценках можно объяснить, вероятно, отличием экспериментальных методик и используемой аппаратуры.

Значительное количество работ было посвящено выяснению причин замедленного заживления лазерных ран [13, 14, 15, 16, 17]. Увеличение сроков заживления лазерных ран может быть объяснено замедлением синтеза коллагена и эпителизации, отсутствием воспалительной реакции на относительно инертный, поврежденный воздействием высокой температуры коллаген, который не имеет хемотаксических свойств, присущих интактному коллагену, а если и имеет, то недостаточно.

Гистологическая картина заключительной стадии заживления ран, нанесенных СО₂-лазером на кожу крыс, показала наличие резорбтивных гранул вокруг карбонизированных, то есть обугленных остатков тканей. Резорбтивные гранулемы, некротическая и карбонизированная пленка в ранах являются причиной большого фиброза и, как следствие, замедления процесса заживления. Необходимо тщательно удалять обугленные частицы ткани из раны [18, 19, 20].

При изучении репаративного процесса в экспериментальных ранах, нанесенных различными хирургическими инструментами, большинство исследователей оценивают динамику заживления на основании клинической и морфологической картины. Что же касается функциональных характеристик (парциальное давление кислорода, скорость кровотока в тканях, планиметрия ран), позволяющих судить о количественной стороне процесса заживления раны и особенностях ее течения, то таких комплексных исследований проведено недостаточно, и в литературе по этому поводу встречаются лишь отдельные сообщения.

Сравнительный анализ реваскуляризации полнослойных кожных трансплантатов на ложе,

сформированных скальпелем и СО₂-лазером, после введения красителя в сосудистое русло подопытного животного показал задержку реваскуляризации лоскута на ложе, сформированного лазером на 5–8-е сутки после операции. Однако это не повлияло на жизнеспособность трансплантата. Отмечается, что решающим моментом в процессе реваскуляризации лоскута является качество воспринимающего ложа [21, 22, 23].

Данные о динамике контракции лазерных и скальпельных ран свидетельствовали о замедлении заживления лазерных. Это объяснялось термическим повреждением эпидермиса и формированием плотного струпа на раневой поверхности, препятствующего контракции и эпителизации. Площадь лазерной раны была меньше скальпельной за счет коагуляции краев раны и отсутствия ложного изъяна, который возникает за счет растяжения краев раны мышцами подкожного слоя. Эпителизация раневой поверхности замедлялась примерно на сутки. Замедление образования эпителиального клина свидетельствовало о повреждении эпителия, которое становилось более заметным через 2–4 дня после операции. Вместе с тем заживление экспериментальных ран, нанесенных СО₂-лазером различной мощности, происходит по общим закономерностям репаративной регенерации. Сроки и характер заживления ран зависит от уровня мощности доставленной к тканям лазерной энергии. С увеличением мощности воздействия излучения увеличивается зона паранекротических изменений, от которых зависят сроки регенерации кожных ран [24].

По мнению В. Н. Таланкина (1984), особенности репаративного процесса лазерных и скальпельных ран заключаются в том, что в отличие от часто встречающегося заживления вторичным натяжением может иметь место репаративный процесс, связанный со снижением или отсутствием хемотаксической активности самой поврежденной ткани или отсутствием микроорганизмов, что характеризуется выпадением фазы лейкоцитарного расплавления поврежденной ткани. Заживление в этих случаях происходит быстрее. В качестве резорбирующей некротическую ткань системы выступает система мононуклеарных фагоцитов, способная действовать одновременно с разрыванием процессов инкапсуляции. Этот путь соответствует заживлению без воспаления, то есть первичным натяжением [25].

Экспериментальные исследования на крысах и кроликах показали, что образование зон некроза и некробиоза наступает вследствие испарения тканевой жидкости и коагуляции клеточных и тканевых элементов, а величина его связана с незначительным распространением тепла в стороны и зависит от мощности лазерного излучения и вида ткани. В зоне некроза происходит коагуляция стенок сосудов с образованием коагуляционного тромба, который закупоривает сосуды, обеспечивая надежный гемостаз. Рассечение тканей скальпелем можно выполнять быстрее, чем

лучом лазера, однако оно всегда сопровождается кровотечением и образованием послеоперационных гематом.

Начальная фаза заживления ран после воздействия лазера характеризуется обязательным формированием на поверхности раны слоя коагуляционного некроза, лежащего в основе образования лазерного струпа. Известно, что инфракрасное излучение СО₂-лазера полностью поглощается тканевой и внутритканевой жидкостью, которая при действии на нее лазерного излучения испаряется, а сухой остаток сгорает, благодаря чему происходит рассечение тканей.

Применение методики фотогидравлической препаровки существенно изменяет механизм лазерной диссекции, уменьшая зону некроза и парабиоза в два раза. В наружных слоях лазерного струпа образуются полости, разделенные деформированными остатками клеток и полностью нежизнеспособные. В глубине ткани отсутствуют циркуляторные нарушения, что свидетельствует о строго ограниченной глубине проникновения лазерного луча. Переходные зоны между некротическими и сохраненными тканями отсутствуют. В лазерных ранах в глубине могут длительно сохраняться «глубьки» коагулированных тканей в окружении макрофагов [26].

В. И. Елисеенко считает, что «...для лазерных ран стереотипность экссудативной воспалительно-репаративной реакции изменяется и характеризуется ранней активацией пролиферации клеточных элементов макрофагального и фибробластического ряда на границе поврежденных и интактных тканей. Большое значение в процессе заживления лазерных ран имеет присутствие клеток системы мононуклеарных фагоцитов – макрофагов. Их функциональная роль видится в программировании всего хода заживления лазерных ран. Не отмечается формирования демаркационной нейтрофильной инфильтрации, характерной для заживления хирургических ран, нанесенных скальпелем или электроножом» [27].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обобщая результаты экспериментальных работ по использованию лазерного излучения высокой интенсивности в кожно-пластической хирургии, можно выделить положительные стороны этих исследований:

стерильность – снижение риска послеоперационных осложнений;

гемостатичность – уменьшение опасности образования гематом в послеоперационном периоде, что особенно важно при трансплантации кожных лоскутов;

хороший обзор операционного поля.

Недостаток при использовании лазера – это уменьшение скорости заживления ран, по мнению многих авторов, вследствие замедления образования коллагена и эпителизации. Это подтверждается снижением тензометрических свойств лазерных ран. Замедление

репаративных процессов лазерных ран может быть объяснено также ингибированием фазы экссудативного воспаления в результате уменьшения миграции в зону повреждения макрофагов, которые, как известно, выделяют факторы, участвующие в клеточных реакциях в ходе репаративного процесса [28]. Однако это предположение не подтверждено соответствующими экспериментальными исследованиями. Следует отметить, что замедление восстановительных процессов в ранах, нанесенных лазером, более характерно для эпителизованных поверхностей.

ВЫВОДЫ

В настоящее время в большинстве стран наблюдается интенсивное внедрение лазерной техники в медицину. Уникальные свойства лазерного излучения – бескровно рассекать ткани, выпаривать и стерилизовать патологические очаги и раневые поверхности, коагулировать сосуды и оказывать биостимулирующее действие на ткани – открыли широкие возможности его применения в различных областях хирургии [29, 30, 31, 32, 33].

Вместе с тем накопившиеся экспериментальные и клинические данные указывают на не всегда благоприятные исходы лазерной хирургии. Это связано с недостаточно полным изучением реакции тканей на лазерное воздействие и заставляет более критично оценивать возможности и недостатки использования лазеров в лечебной практике.

«Период слепого увлечения лазерами прошел, наступило время трезво оценить достоинства и недостатки лазерной хирургии, определить четкие границы клинического применения лазеров», – пишет G. A. Dixon [34].

Основными направлениями исследований лазерных методик в настоящее время являются:

– изучение взаимодействия лазерного излучения с биологическими структурами на основе новейших достижений науки;

– поиск новых форм и сфер применения лазеров, исключающих или уменьшающих негативные стороны воздействия лазерного излучения.

Большой интерес в этом плане имеет применение различных источников лазерного излучения в пластической хирургии и косметологии. По понятным причинам возможность использования лазеров представляет определенный интерес для лазерных хирургов. И это вполне обоснованно, что именно этим аспектам применения лазеров в медицине уделяется большое внимание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Воздействие лазерного излучения на биологические объекты, и в частности, на кожу, – специфическое, отличное от всех других известных видов воздействия. Специфичность действия лазерного излучения на ткани зависит от мощности лазерного излучения,

энергии и ее плотности на единицу облучаемой поверхности, длины волны излучения, времени воздействия и т.д., а также от особенностей самих биологических тканей: морфологической структуры, содержания пигмента, плотности и особенностей васкуляризации.

Противоречивые данные о преимуществах и отрицательных сторонах лазерной хирургии, малое количество исследований с использованием функциональных методов и недостаточно полное изучение патофизиологических механизмов течения раневого процесса после воздействия лазерного излучения высокой интенсивности на биологические структуры, отсутствие четких методических рекомендаций по использованию различных источников лазерного излучения, отсутствие информации и в то же время перспективность использования лазеров в хирургической косметологии – все это послужило причиной для проведения анализа зарубежной и отечественной литературы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брехов Е.И., Елисеенко В.И., Калинин В.В. Применение CO₂-лазера при операциях на коже. *Электронная промышленность*. 1984; (10): 53–56.
2. Гамалея Н.Ф. О механизме биологического действия излучения лазеров. Всесоюзный симпозиум «Биологическое и противоопухолевое действие излучения лазеров». Тез. докл. М., 1971; 3–9.
3. Dixon J.A. Current Laser Application in General Surgery.. *Annals, of Surg.* 1988; 207 (4): 355–372.
4. Дубенский В.В., Дубенский В.В., Хомулло Г.В., Туманова К.О. Морфологические особенности экспериментальных ран у животных, нанесенных различными методами оперативного воздействия. *Современные проблемы дерматовенерологии, иммунологии и врачебной косметологии*. 2012; 1(20): 7–12.
5. McKenzie A.L., Carruth J.A. Laser in syrgery and medicine. *Phys. Med. and Biol.* 1984; 29 (6): 619–641.
6. Hall R.R., Roach A.D., Beker E. et al. Incision of tissue by carbon dioxide laser. *Nature*. 1971; 252 (5306): 131–132.
7. Norris C.W., Mullorky M.B. Experimental skin incision made with the CO₂ laser. *Laryngoscope*. 1982; 92 (4): 416–419.
8. Горбатова Н.Е., Золотов С.А., Симановский Я.О., Никифоров С.М., Голубев С.В., Алимпиев С.С., Гейниц А.В., Елисеенко В.И., Станкова Н.В. Экспериментальная сравнительная оценка эффективности режимов абляции различной длительности импульсами CO₂-лазеров на кожных покровах мини-свиней для целей лазерной дерматологии. *Биомедицина*. 2013; (4): 90–106.
9. Белоглядова Н.И. Сравнительная характеристика приживления ауто- и гомотрансплантата кожи в эксперименте. *Труды Курского мед. ин-та*. Курск, 1959; 149–152.
10. Buell B.R., Skuller D.E. Comparison of tensile strength in CO₂ laser and scalpel skin incisions. *Arch. Otoloryngol.* 1983; 109: 465–467.
11. Липова Е.В., Рахматулина М.Р., Глазко И.И., Чекмарев А.С. Лазерные и радиоволновые технологии в дерматовенерологии и косметологии. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2020; 65 (5): 68–76.
12. Шептий О.В. Биологические эффекты взаимодействия лазерного излучения с кожей. *Вестник эстетической медицины*. 2011; 10 (2): 51–57.
13. Cochrane L.P., Beacon J.P., Creasey G.H. et al. Wound healing after laser surgery: an experimental study. *Br. J. Surg.* 1980; 67: 740–743.
14. Kamat B. Cutaneous tissue repair following CO₂-laser irradiation. *J. Invest. Dermatol.* 1986; (87): 268–271.
15. Варев Г.А., Кудрин К.Г., Давыдов Д.В., Решетов И.В., Кортунов В.Н., Коновалов А.Н. Выбор режимов работы хирургического CO₂-лазера в реконструктивной пластической хирургии. *Анналы пластической, реконструктивной и эстетической хирургии*. 2017; (1): 50–56.
16. Подурар С.А., Горбатова Н.Е., Брянцев А.В., Дуванский В.А., Тертычный А.С., Варев Г.А., Никифоров С.М., Симановский Я.О. Сравнительное экспериментальное исследование воздействия «синего» ($\lambda = 450$ нм) и импульсно-периодического CO₂ ($\lambda = 10,6$ мкм) лазерного излучения на кожу лабораторных животных. *Лазерная медицина*. 2023; 27 (4): 16–25.
17. Мартов А.Г., Баранов А.В., Бактемиров Р.Г., Альпин Д.М. Применение лазерного излучения в урологии. *Лазерная медицина*. 2020; 24 (1): 57–62.
18. Nakagawa H., Tan. O.T. Ultrastructural changes in human skin after exposure to a pulsed laser. *J. Invest, dermatol.* 1985; 84 (5): 396–400.
19. Шептий О.В., Круглова Л.С., Жукова О.В., Эктова Т.В., Ракша Д.А., Шматова А.А. Высокоэнергетическое лазерное излучение в дерматологии и косметологии. *Российский журнал кожных и венерических болезней*. 2012; (6): 39–43.
20. Жижин Н.К., Колбас Ю.Ю., Кузнецов Е.В. Использование лазеров в хирургии. *Фотоника*. 2020; 14 (3): 282–292.
21. Богатов В.В., Давыдов Б.Н., Соловьев В.А. Применение ОКТ «Скальпель-1» при свободной трансплантации кожи и местнопластических операциях. *Применение методов и средств лазерной технологии в биологии и медицине*. Киев. 1981.
22. Sekan V., Brosman M., Zboja S. et al. Effect of laser rays on skin and laser for plastic surgery uses. *Acta. Chirurg. Plast.* 1986; 28 (1): 1–6.
23. Чумакова А.А., Вахонина Р.К., Ключкова С.В. Методы светотерапии при репаративной регенерации кожных покровов. В сборнике: Клинико-морфологические аспекты фундаментальных и прикладных медицинских исследований. материалы IV Международной научной конференции. Воронеж, 2023: 97–104.
24. Данилин Н.А., Ворошкевич А.А., Елесеенко В.И. и др. Лазеры в кожно-пластической хирургии. *Актуальные проблемы лазерной медицины*. М., 1990: 89–92.
25. Таланкин В.Н., Боцманов К.В. О путях заживления ран, нанесенных углекислотным лазером. *Арх. пат.* 1984; (9): 48–56.
26. Скобелкин О.К., Брехов Е.И., Давыдов Б.Н. и др., Способ диссекции тканей. Авт. свид. № 628647 от 03.03.1977.
27. Елесеенко В.И. Морфология репаративных процессов при воздействии непрерывного лазерного излучения. *Сов. мед.* 1987. С. 20–27.
28. Саркисов Д.С. Регенерация и ее клиническое значение. М.: Медицина, 1970: 284 с.

29. Жижин Н.К., Колбас Ю.Ю., Кузнецов Е. В. Использование лазеров в хирургии. *Фотоника*. 2020; 14 (3): 282–292.
30. Лазер – главный инструмент медиков и косметологов. *Пластическая хирургия и косметология*. 2013; (1): 168.
31. Касьянов Д.А. Лазерные технологии и их применение в медицине: предпосылки и влияния. *StudNet*. 2022; 5 (6): 211.
32. Зайцев Н.С., Илюхин Р.В. Этапы развития пластической хирургии. *Научный Лидер*. 2024; 4 (154): 120–129.
33. Чумакова А.А., Вахонина Р.К., Клочкова С.В. Методы светотерапии при стимуляции регенеративных процессов кожи. В сборнике: II Международный молодежный морфологический симпозиум. Сборник научных трудов симпозиума. Воронеж, 2024: 104–112.
34. Dixon J.A. Lasers in surgery. *Current Probl. Surg.* 1984; 21 (9): 31–35.

REFERENCES

1. Brekhov E.I., Yeliseenko V.I., Kalinnikov V.V. Application of CO₂ laser in skin surgery. *Elektronnaya promyshlennost*. 1984; (10): 53–56.
2. Gamaleya N.F. On the mechanism of biological action of laser radiation. All-Union symposium "Biological and antitumor action of laser radiation". *Report summary*. Moscow, 1971; 3–9.
3. Dixon J.A. Current Laser Application in General Surgery. *Annals of Surg.* 1988; 207 (4): 355–372.
4. Dubensky V.V., Dubensky V.V., Khomullo G.V., Tumanova K.O. Morphological features of experimental wounds in animals inflicted by various methods of surgical intervention. *Sovremennyye problemy dermatovenerologii, immunologii i vrachebnoy kosmetologii*. 2012; 1(20): 7–12.
5. McKenzie A.L., Carruth J.A. Laser in surgery and medicine. *Phys. Med. and Biol.* 1984; 29 (6): 619–641.
6. Hall R.R., Roach A.D., Beker E. et al. Incision of tissue by carbon dioxide laser. *Nature*. 1971; 252 (5306): 131–132.
7. Norris C.W., Mullorky M.B. Experimental skin incision made with the CO₂ laser. *Laryngoscope*. 1982; 92 (4): 416–419.
8. Gorbatoва N.E., Zolotov S.A., Simanovsky Ya.O., Nikiforov S.M., Golubev S.V., Alimpiev S.S., Geynits A.V., Eliseenko V.I., Stankova N.V. Experimental comparative evaluation of the effectiveness of ablation modes of different durations of CO₂ laser pulses on the skin of mini-pigs for the purposes of laser dermabrasion. *Biomedicina*. 2013; (4): 90–106.
9. Beloglyadova N.I. Comparative characteristics of the engraftment of auto and homotransplant skin in the experiment. *Trudy Kurskogo med. Instituta*. Kursk. 1959: 149–152.
10. Buell B.R., Skuller D.E. Comparison of tensile strength in CO₂ laser and scalpel skin incisions. *Arch. Otolaryngol.* 1983; 109: 465–467.
11. Lipova E.V., Rakhmatulina M.R., Glazko I.I., Chekmarev A.S. Laser and radio wave technologies in dermatovenerology and cosmetology. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost*. 2020; 65 (5): 68–76.
12. Sheptiy O.V. Biological effects of the interaction of laser radiation with the skin. *Bulletin of Aesthetic Medicine*. 2011; 10 (2): 51–57.
13. Cochrane L.P., Beacon J.P., Creasey G.H. et al. Wound healing after laser surgery: an experimental study. *Br. J. Surg.* 1980; 67: 740–743.
14. Kamat B. Cutaneous tissue repair following CO₂-laser irradiation. *J. Invest. Dermatol.* 1986; (87): 268–271.
15. Varev G.A., Kudrin K.G., Davydov D.V., Reshetov I.V., Kortunov V.N., Kononov A.N. Selection of operating modes of a surgical CO₂ laser in reconstructive plastic surgery. *Annaly plasticheskoy, rekonstruktivnoy i esteticheskoy khirurgii*. 2017; (1): 50–56.
16. Podurar S.A., Gorbatoва N.E., Bryancev A.V., Duvansky V.A., Tertychny A.S., Varev G.A., Nikiforov S.M., Simanovsky Ya.O. Comparative experimental study of the effect of "blue" ($\lambda = 450$ nm) and pulsed-periodic CO₂ ($\lambda = 10.6$ μ m) laser radiation on the skin of laboratory animals. *Lazernaya medicina*. 2023; 27 (4): 16–25.
17. Martov A.G., Baranov A.V., Baktemirov R.G., Alpin D.M. Use of laser radiation in urology. *Lazernaya medicina*. 2020; 24 (1): 57–62.
18. Nakagawa H., Tan. O.T. Ultrastructural changes in human skin after exposure to a pulsed laser. *J. Invest. dermatol.* 1985; 84 (5): 396–400.
19. Sheptiy O.V., Kruglova L.S., Zhukova O.V., Ektova T.V., Raksha D.A., Shmatova A.A. High-energy laser radiation in dermatology and cosmetology. *Rossiyskiy zhurnal kozhnykh i venericheskikh bolezney*. 2012; (6): 39–43.
20. Zhizhin N.K., Kolbas Yu.Yu., Kuznetsov E.V. Use of lasers in surgery. *Photonika*. 2020; 14 (3): 282–292.
21. Bogatov V.V., Davydov B.N., Soloviev V.A. Application of OCT "Scalpel-1" in free skin transplantation and local plastic surgeries. *Primeneniye metodov i sredstv lazernoy tekhnologii v biologii i meditsine*. Kiev. 1981.
22. Sekan V., Brosman M., Zboja S. et al. Effect of laser rays on skin and laser for plastic surgery uses. *Acta. Chirurg. Plast.* 1986; 28 (1): 1–6.
23. Chumakova A.A., Vakhonina R.K., Klochkova S.V. Light therapy methods for reparative regeneration of the skin// In the collection: Clinical and morphological aspects of fundamental and applied medical research. *Proceedings of the IV International Scientific Conference*. Voronezh, 2023: 97–104.
24. Danilin N.A., Voroshkevich A.A., Elesenko V.I. et al. Lasers in skin-plastic surgery. *Aktual'nyye problemy lazernoy meditsini*. Moscow, 1990: 89–92.
25. Talankin V.N., Botsmanov K.V. On the healing paths of wounds caused by a carbon dioxide laser. *Arch. patent*. –1984.; 9: 48–56.
26. Skobelkin O.K., Brekhov E.I., Davydov B.N. and others, Method of tissue dissection. Author's certificate No. 628647 dated 03.03.1977.
27. Yeliseenko V.I. Morphology of reparative processes under the influence of continuous laser radiation. *Sov.med.* 1987. P. 20–27.
28. Sarkisov D.S. Regeneration and its clinical significance. Moscow, Medicine, 1970: 284.
29. Zhizhin N.K., Kolbas Yu.Yu., Kuznetsov E.V. Use of lasers in surgery. *Fotonika*. 2020; 14 (3): 282–292.
30. Laser – the main tool of doctors and cosmetologists. *Plasticheskaya khirurgiya i kosmetologiya*. 2013; (1): 168.
31. Kasyanov D.A. Laser technologies and their application in medicine: background and influence. *StudNet*. 2022; 5 (6): 211.
32. Zaitsev N.S., Ilyukhin R.V. Stages of development of plastic surgery. *Nauchnyy Lider*. 2024; 4 (154): 120–129.
33. Chumakova A.A., Vakhonina R.K., Klochkova S.V. Methods of light therapy in stimulation of skin regenerative processes.

In the collection: II International Youth Morphological Symposium. Collection of scientific papers of the symposium. Voronezh, 2024: 104–112.

34. Dixon J.A. Lasers in surgery. *Current Probl. Surg.* 1984; 21 (9): 31–35.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

Authors declare no conflict of interests.

Информация об авторах

Данилин Николай Алексеевич – доктор медицинских наук, профессор, отделение лазерных технологий в хирургии ФГБУ «Научно-практический центр лазерной медицины им. О.К. Скобелкина» ФМБА России; e-mail: danilin_nikolai@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2937-8173>

Курдяев Игорь Владиславович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, отделение лазерных технологий в хирургии ФГБУ «Научно-практический центр лазерной медицины им. О.К. Скобелкина» ФМБА России; e-mail: ochen_rad@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6045-4456>

Дербенев Валентин Аркадьевич – доктор медицинских наук, профессор, руководитель отделения лазерных технологий в хирургии ФГБУ «Научно-

практический центр лазерной медицины им. О.К. Скобелкина» ФМБА России; e-mail: profDerbenev@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1673-7800>

Мариничева Ирина Геннадьевна – доктор медицинских наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, кафедра пластической, реконструктивной хирургии, косметологии и клеточных технологий ФДПО; e-mail: marinicheva-ig@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8660-7783>

Information about the authors

Nikolai A. Danilin – Dr. Sci. (Med.), Professor, Department of Laser Technologies in Surgery in Skobelkin State Scientific Center for Laser Medicine of FMBA of Russia; e-mail: danilin_nikolai@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2937-8173>

Igor V. Kurdyayev – Cand. Sci. (Med.), Department of Laser Technologies in Surgery in Skobelkin State Scientific Center for Laser Medicine of FMBA of Russia; e-mail: ochen_rad@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6045-4456>

Valentin A. Derbenev – Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Laser Technologies in Surgery in "Skobelkin State Scientific Center for Laser Medicine of FMBA of Russia"; e-mail: profDerbenev@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1673-7800>

Irina G. Marinicheva – Dr. Sci. (Med.), Professor, Pirogov Russian National Research Medical University, Department of Plastic, Reconstructive Surgery, Cosmetology and Cell Technologies FDPO; e-mail: marinicheva-ig@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8660-7783>