

2. Елисеенко В.И. Патогенетические механизмы взаимодействия различных видов лазерного излучения с биологическими тканями // Лазеры в хирургии / Под ред. проф. О.К. Скобелкина. – М.: Медицина, 1989. – С. 44–57.
3. Елисеенко В.И. Патологическая анатомия и патогенез лазерной раны // Лазерная медицина. – 2017. – Т. 21. – Вып. 4. – С. 5–11.
4. Копасов Е.В. Резекция почки с помощью высокоинтенсивного лазерного излучения с пластикой ксеногенным материалом: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. – Челябинск, 2009. – 26 с.
5. Морозова Е.А., Елисеенко В.И., Давтян А.А., Корнильев М.Н. Патологическая анатомия и патогенез лазерной раны // Лазерная медицина. – 2017. – Т. Вып. 3. – С. 22–27.
6. Demirjian S., Lane B.R., Derweesh I.H. et al. Chronic kidney disease due to surgical removal of nephrons: relative rates of progression and survival // J. Urol. – 2014. – V. 192. – P. 1057–1063.
7. Khoder W.Y., Zilinger K., Waidelich R. et al. Ex vivo comparison of the tissue effects of six laser wavelengths for potential use in laser supported partial nephrectomy // J. Biomed. Opt. 2012. – V. 17. – Is. 6. <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Journal-of-Biomedical-Optics/volume-17/issue-6/068005/iEx-vivo-i-comparison-of-the-tissue-effects-of-six/10.1117/1.JBO.17.6.068005.short>.
8. Khoder W.Y., Sroka R., Siegert S. et al. Outcome of laser-assisted laparoscopic partial nephrectomy without ischaemia for peripheral renal tumours // World J. Urol. – 2012. – V. 30. – Is. 5. – P. 633–638.
9. Knezevic N., Kulis T., Maric M. et al. Laparoscopic partial nephrectomy with diode laser: a promising technique // Photomed. Laser. Surg. – 2014. – V. 32. – P. 101–105.
10. Loertzer H., Strauss A., Ringert R.H. et al. Laser supported partial laparoscopic nephrectomy for renal cell carcinoma without ischaemia time // BMC Urology. – 2013. – P. 13–31.
11. Lotan Y., Gettman M.T., Lindberg G. et al. Laparoscopic partial nephrectomy using holmium laser in a porcine model // J. SLS. – 2004. – V. 8. – Is. 1. – P. 51–55.
12. Mari A., Antonelli A., Bertolo R. Predictive factors of overall and major postoperative complications after partial nephrectomy: Results from a multicenter prospective study (The RECORd 1 project) // Eur. J. Surg. Oncol. – 2017. – V. 43. – Is. 4. – P. 823–830.
13. Zhou X.F., Ding Z.S., Wang J.F. et al. Laparoscopic partial nephrectomy by diode laser with highly selective clamping of segmental renal arterial // Chin. Med. J. – 2015. – V. 128. – P. 2262–2264.

Поступила в редакцию 26.02.18 г.

Для контактов: Фирсов Константин Андреевич
E-mail: leneror@yandex.ru

УДК 616.5-001.22

Мухин А.С., Леонтьев Е.А.

Оптимизация оптико-физических характеристик излучения лазера с модулированной добротностью

Mukhin A.S., Leont'ev E.A.

Optimization of optical and physical characteristics of Q-Switched laser radiation

БУ «Городская клиническая больница №1» Министерства здравоохранения Чувашской Республики, г. Чебоксары

В статье приводятся данные о повышении эффективности лазеротерапии в деструкции имплантированного в кожу пигмента. После проведения статистического анализа 2294 татуировочных пигментов рекомендовано дополнить лазерные аппараты излучателями с длинами волн 430, 480, 560 нм. Использование дополнительных излучателей позволяет высокоэффективно разрушать пигментные частицы в эпидермисе и уменьшить риск опасных осложнений. *Ключевые слова:* тату, татуировочный пигмент, удаление тату, лазеротерапия.

This paper presents the on the increase in the effectiveness of physiotherapy destruction implanted in the skin pigment. After statistical analysis 2294 tattooing pigments, it is recommended to complement laser devices emitters with wavelengths of 430, 480, 560 nm. The use of additional emitters allows highly effective in destroying the pigment implanted in the epidermis and reduce the risk of dangerous complications. *Keywords:* tattoo, tattoo pigment, tattoo removal, lasertherapy.

Введение

Несмотря на то что для удаления татуажного пигмента в эпидермисе предложено много методов, все методы можно объединить в три группы: деструкция пигментных частиц вместе с эпидермисом, иссечение кожи и селективная фотокавитация [1, 3, 4, 6, 7]. Результаты деструкции или иссечения эпидермиса редко дают удовлетворительный косметический результат [7, 11]. В последние годы лазерная хирургия благодаря методу лазерной селективной фотокавитации практически вытеснила все остальные методы удаления татуажного пигмента [8–10]. Татуажный пигмент способен поглотить только лазерное излучение с определенными спектральными характеристиками [2, 5].

Несмотря на то что медицинская промышленность может нам предложить лазеры с модулированной доброт-

ностью, практически любой длиной волны в диапазоне 400–1000 нм, на сегодняшний день на рынке распространены лазеры с модулированной добротностью с длинами волн 532 нм и 1064 нм [7]. W. Bäumlér в своем исследовании доказал, что отдельные пигменты имеют пик поглощения, отличный от характеристик коммерческих лазеров с модулированной добротностью [7, 11]. И следовательно, в свете изложенных фактов, мы считаем целесообразным расширить частотные характеристики лазерных излучателей.

Цель работы: Оптимизация метода лазерной селективной фотокавитации.

Материалы и методы исследования

Для решения данной задачи мы отобрали 2294 образца наиболее распространенных на рынке пигмен-

тов, в которые вошли как пигменты производителей с мировым именем (Bio Touch, TKL, Lushcolor, Goochie, EXCALIBUR Tattoo INK «Dark Shadow», World Famous Tattoo Ink, Eternal Ink, Intenze, Nocturnal Tattoo Ink, Millennium), так и пигменты кустарного и неизвестного происхождения (гелевые чернила, тушь, сажа и т. д.). В нашем исследовании были использованы фотометры КФК-3, СФ-56 и SP-1105 (JENWAY 6700). Данные приборы могут быть использованы для спектральной оценки излучения с длиной волны от 340 до 1100 нм и для измерения спектрального коэффициента направленного пропускания (СКНП) в диапазоне от 1 до 99, оптической плотности (от 0,004 до 2 Б), скорости измерения оптической плотности (моль/(л·с)). После калибровки КФК-3 мы можем определить оптическую плотность любого из представленных пигментов с последующим построением спектрограммы. Прибор позволяет нам измерить и отобразить спектральную характеристику практически любого пигмента путем распределения поглощения энергии излучения по частотам. Таким образом, мы сможем сделать вывод о количестве энергии, переданной пигментным частицам лазерным излучением.

В случае если оператор использует одновременно несколько пигментов, пигменты «смешиваются» и визуальный анализ полученной композиции становится затруднительным. Несмотря на это, спектрофотометр без труда различает отдельные составляющие композиции. В случае взаимодействия пигментов образуется новое вещество с иными физико-оптическими характеристиками. На построенной спектрограмме практически всегда можно обнаружить один или несколько максимумов поглощения (пиков поглощения). Пик поглощения на спектрограмме характеризует максимум оптической плотности красителя. Таким образом, максимум оптической плотности красителя характеризует длину волны, наиболее поглощаемую пигментом.

Для унификации оптико-физических характеристик источников лазерного излучения мы расширили диапазоны пиков поглощения. Для этой цели основа пика поглощения принималась за 100 процентов. Далее мы определяли количество энергии, сохраняющее эффективное воздействие на частицы пигмента. Данная величина выражалась в процентах (при базе, принятой за 100) или коэффициентах (если база – единица) от высоты спектра.

Методика определения максимумов оптической плотности красителя заключалась в следующем. Для проведения исследования первоначально были приготовлены растворы пигментов в дистиллированной воде в дозе 0,2 мг/мл, готовые формы растворов применены в дозе, рекомендуемой производителем. В экспериментальную кювету нами был налит готовый раствор, контрольным раствором служила дистиллированная вода. Далее обе кюветы помещались в аппарат фотометр, причем экспериментальный раствор – в ближнее гнездо, соответственно, контрольный – в дальнее. Для получения темнового потока производился замер с открытой крышкой. Установили исследуемую длину волны и при закрытой крышке проверили установленные начальные отсчеты светопропускания ($100 \pm 0,2\%$) и оптической плотности ($0,000 \pm 0,002$). Большие отклонения не допускаются. Измерения снимались каждые 10 нм, при приближении к максимуму

оптической плотности красителя каждые 2 нм. После помещения в световой поток экспериментальной кюветы вычислялись коэффициенты поглощения света и оптической плотности вещества. Данные проверяли не менее 4 раз, высчитывали среднее арифметическое число и заносили полученные значения в сводную таблицу. По данным сводной таблицы построили спектральные кривые – светопропускания и оптической плотности, где ось абсцисс – длина волны в нанометрах, а ось ординат – оптическая плотность (рис. 1).

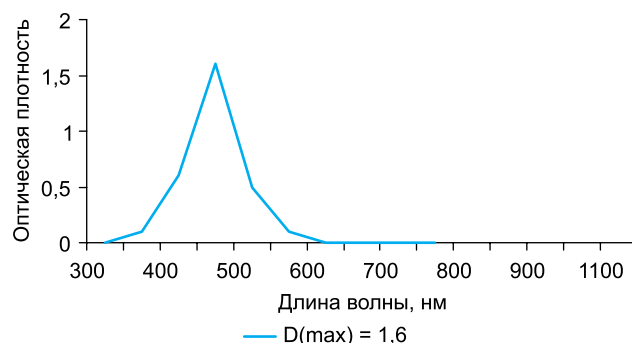


Рис. 1. Спектр поглощения раствора кобальтового пигмента

Анализ данных спектрограммы позволяет нам утверждать, что максимум оптической плотности данного пигмента соответствует длине волны 470 нм. На первом этапе исследования построены спектрограммы всех исследованных пигментов. На втором этапе после компьютерной обработки полученных данных найдено оптимальное соотношение оптико-физических характеристик лазерного излучения.

Результаты и их обсуждение

После проведения исследования всех 2294 пигментов вычислены максимумы оптической плотности. Практически каждый пигмент имеет уникальный пик поглощения. Если мы в практической работе будем ориентироваться на уникальный максимум оптической плотности, нам потребуется 2294 источника лазерного излучения.

Для унификации оптико-физических характеристик источников лазерного излучения мы расширили диапазоны пиков поглощения. Для этой цели основа пика поглощения принималась за 100%. Далее мы определяли количество энергии, сохраняющее эффективное воздействие на частицы пигмента. Данная величина выражалась в процентах (при базе, принятой за 100) или коэффициентах (если база – единица) от высоты спектра.

Для оценки количества энергии, сохраняющего эффективное воздействие, мы подвергли пигментные частицы воздействию лазерного излучения с количеством энергии более 95%, 95–87%, 87–81%, менее 81% от пика поглощения. Далее проведена обработка данных методами математической статистики. Выявлено, что при увеличении доли энергии от пика поглощения растет и количество максимумов диапазона. Данные представлены в табл. 1.

Под воздействием энергии в 95–87% от пика поглощения количество оптических максимумов практически равно количеству исследуемых пигментов. Под

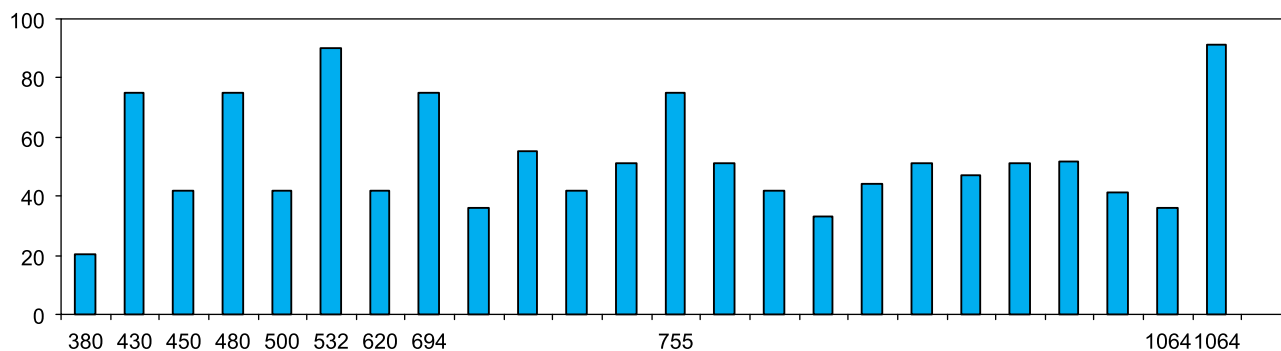


Рис 2. Средние показатели оптической плотности пигментов под воздействием энергии в 95–87% от пика поглощения

Таблица 1
Количество возможных вариантов максимумов оптической плотности в зависимости от значения пикового уровня

Количество энергии от пика поглощения, в процентах	Количество оптических максимумов диапазона
Более 95	–
95–87	24
87–81	7
Менее 81	4

воздействием энергии в 95–87% от пика поглощения статистическая обработка данных смогла объединить в 24 группы оптические максимумы, использовать данное значение в практической работе также не представляется возможным. В этом случае потребуется не менее 24 источников излучения с различными оптическими характеристиками. Данные представлены на рис. 2.

Под воздействием энергии в 87–81% от пика поглощения статистическая обработка данных смогла выделить 7 групп оптических максимумов. Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2
Количественные показатели максимумов оптической плотности красителя под воздействием энергии в 87–81% от пика поглощения

	Длина волны, нм						
Показатель	430 ± 3,8	480 ± 2,4	532 ± 2,8	560 ± 2,3	694 ± 3,5	755 ± 3,1	1064 ± 3,9

Примечание. Во всех группах данные статистически достоверны ($p < 0,01$).

Нам представляется наиболее эффективным использование показателя диапазона 87–81% от пика поглощения, это позволяет разделить пигменты на 7 групп и использовать излучение с длинами волн: 430, 480, 532, 560, 694, 755, 1064 нм.

Дальнейшее уменьшение величины от пика поглощения до 81% дает нам 4 группы со значениями 532, 694, 755 и 1064 нм. Данные представлены в табл. 3.

Таблица 3
Количественные показатели максимумов оптической плотности красителя при значении пикового уровня 81%

	Длина волны, нм			
Показатель	532 ± 8,1	694 ± 5,9	755 ± 12,5	1064 ± 13,0

Примечание. Во всех группах данные статистически достоверны ($p < 0,01$).

Так как полученные данные повторили частоты коммерческих лазерных аппаратов, можно предположить,

что производитель необоснованно сузил диапазон менее 81% от пика поглощения с целью удешевления технологии. И как следствие пики поглощения отдельных пигментов находятся за пределами частоты коммерческих лазерных аппаратов и практически не поддаются лазерному лечению.

Выводы

После обработки полученных данных можно утверждать, что использование источника лазерного излучения с длинами волн 532, 694, 755 и 1064 нм не может эффективно разрушить все исследованные нами пигменты. Для эффективного лечения требуется добавить источники лазерного излучения с длиной волны 430, 480, 560 нм.

Литература

1. Авраменко С.В., Ступин И.В. Устройство коагуляции тканей: Патент РФ 2100013-1997.
2. Беликов А.В., Скрипник А.В. Лазерные биомедицинские технологии (Часть 2). Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 100 с.
3. Мухин А.С., Леонтьев Е.А. Деструкция поверхностного слоя эпидермиса увеличивает глубину проникновения лазерного излучения в биологические ткани // Врач-аспирант. – 2017. – Т. 81. – № 2. – С. 75–81.
4. Мухин А.С., Леонтьев Е.А. Оптимизация оптико-физических характеристик селективного фототермолиза // Врач-аспирант. – 2017. – Т. 83. – № 4. – С. 84–90.
5. Москвин С.В., Ачилов А.А. Основы лазерной терапии. – М.–Тверь.: Триада, 2008. – 256 с.
6. Anderson R.R. Selective photothermolysis. Precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation // Science. – 1983. – Vol. 220. – P. 524–527.
7. Baumler W., Eibler E.T., Hohenleutner U. et al. Q-switch laser and tattoo pigments: first results of the chemical and photophysical analysis of 41 compounds // Lasers Surg. Med. – 2000. – Vol. 26. – P. 13–21.
8. Laumann A.E., Derick A.J. Tattoos and body piercings in the United States; a national data set [published online ahead of print June 16, 2006] // Am. Acad. Dermatol. – 2006. – Vol. 55. – P. 413–421.
9. Murphy Michael J. A novel, simple and efficacious technique for tattoo removal resulting in less pain using the Q-switched Nd:YAG laser // Lasers in Medical Science. – 2014. – Vol. 29 (4). – P. 1445–1447.
10. Suchin K.R., Greenbaum S.S. Successful treatment of a cosmetic tattoo using a combination of lasers // Dermatol. Surg. – 2004. – Vol. 30. – P. 105–107.
11. Taylor Charles R. Laser ignition of traumatically embedded firework debris // Lasers in Surgery and Medicine. – 1998. – Vol. 22. – P. 157–158.

Поступила в редакцию 10.01.18 г.

Для контактов: Леонтьев Евгений Анатольевич
E-mail: lea737@yandex.ru