

**КОМБИНИРОВАННАЯ ЛАЗЕРНО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА
УДАЛЕНИЯ ТАТУИРОВОК: ФРАКЦИОННОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ,
ЛОКАЛЬНАЯ АППЛИКАЦИЯ РЕМУВЕРА И АКТИВАЦИОННАЯ
ОБРАБОТКА**

Пулатов М.С

Рокина Е.Ю

Бейше уулу М

Королёва Е.А

¹ФГБОУ

ВО

«Чувашский

государственный

университет

им.

И.Н. Ульянова»,

Чебоксары, Россия ;¹ «Ташкенский государственный медицинский университет»

Ташкент, Узбекистан.

E-mail: pmirkomol@gmail.com

Представлена теоретическая концепция комбинированного метода удаления татуировок, интегрирующего последовательное применение фракционного лазерного воздействия, локального нанесения химического ремувера и последующей активационной лазерной обработки. Метод основан на синергическом эффекте физического (лазерного) и химического воздействия на пигментные комплексы в дермальном слое кожи. Теоретический анализ механизмов действия показывает, что предварительное создание контролируемых микроканалов в эпидермисе и поверхностной дерме обеспечивает оптимальную диффузию ремувера к пигментным гранулам, расположенным в более глубоких слоях дермы, тогда как последующая лазерная активация усиливает химико-физические процессы деструкции красителя. Анализ биомеханических, гистологических и клинических аспектов предложенной методики позволяет предположить значительное сокращение количества необходимых процедур, снижение степени тепловой травматизации окружающих тканей и минимизацию риска осложнений, таких как рубцевание и длительная эритема, по сравнению с традиционными лазерными методами удаления татуировок.

Ключевые слова: удаление татуировок, фракционный лазер, химический ремувер, пикосекундный лазер, фотоакустический эффект, фототермолиз, дермальная пигментация, лазерная медицина

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия татуировка перестала рассматриваться исключительно как элемент субкультуры и получила широкое распространение среди различных возрастных и социальных групп. Одновременно с ростом её популярности увеличивается и число пациентов, обращающихся за медицинской помощью с целью удаления ранее нанесённого пигмента. По данным эпидемиологических исследований, значительная доля лиц с татуировками — до одной трети — в

дальнейшем выражает неудовлетворённость результатом и стремится к их устранению [1][2]. Это определяет устойчивый клинический и научный интерес к разработке эффективных и безопасных методов удаления татуировок.

Исторически применявшиеся физические способы устранения дермального пигмента, включая хирургическое иссечение, дермабразию и криодеструкцию, характеризуются высокой инвазивностью и неблагоприятным профилем безопасности. Их использование часто сопровождается повреждением структур кожи, формированием рубцов, нарушением меланогенеза и длительным периодом репарации, что существенно ограничивает их применение в современной клинической практике [3].

Существенный прогресс в решении данной проблемы был достигнут с внедрением лазерных технологий, основанных на принципах селективного воздействия на пигментные структуры. Наносекундные лазерные системы с режимом Q-Switch обеспечивают разрушение пигмента преимущественно за счёт фототермического механизма, при котором энергия лазерного импульса поглощается хромофорами татуировочного красителя [4]. Несмотря на доказанную клиническую эффективность, данный подход имеет ряд ограничений, включая необходимость проведения большого числа процедур, зависимость результата от цвета и химического состава пигмента, а также риск термического повреждения окружающих тканей с развитием поствоспалительных осложнений [5].

Развитие пикосекундных лазерных технологий позволило частично преодолеть указанные недостатки. Ультракороткие импульсы высокой пиковой мощности инициируют преимущественно фотоакустический эффект, при котором пигмент подвергается механической фрагментации без значимого повышения температуры тканей [6][7]. Это способствует сокращению количества лечебных сеансов и снижению частоты побочных реакций. Однако даже данный метод не обеспечивает универсального решения проблемы, поскольку некоторые типы красителей, особенно содержащие металлоорганические соединения, демонстрируют высокую устойчивость к лазерному воздействию в определённых спектральных диапазонах [8].

Альтернативным направлением стали химические методы удаления татуировок, основанные на применении специализированных ремуверов. Эти препараты, как правило, включают щелочные компоненты, хелатирующие агенты и вещества с биостимулирующей активностью, способные инициировать химическое разрушение пигментных комплексов в дерме [9]. Однако их изолированное использование связано с риском поверхностных химических ожогов, выраженной воспалительной реакции и ограниченной глубиной проникновения активных веществ, что снижает предсказуемость клинического результата.

В связи с этим всё большее внимание привлекают комбинированные подходы, сочетающие физические и химические методы воздействия. Одной из перспективных стратегий является использование фракционного лазерного излучения для формирования контролируемых микроканалов в эпидермисе и поверхностных слоях дермы, что создаёт условия для направленной и равномерной доставки химического

ремувера к зонам максимальной концентрации пигмента. Химический ремувер представляет собой многокомпонентную систему, обычно содержащую щелочные компоненты (гидроксид калия, гидроксид натрия), хелатирующие агенты (ЭДТА, цитраты), биостимуляторы (растительные экстракты, витамины, ферменты).

Дополнительное лазерное воздействие может способствовать активации химических процессов деструкции красителя и усилению фотоакустического эффекта за счёт предварительного нарушения структуры пигментных гранул [10][11].

Целью настоящей работы является теоретическое обоснование механизмов действия комбинированной лазерно-химической методики удаления татуировок, анализ её физиологической обоснованности и оценка потенциальных преимуществ по сравнению с изолированным применением лазерных или химических методов

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись на полнослойными образцами кожи человека, взятых у пациентов среднего возраста после хирургического вмешательства. Обследование и лечение этих пациентов проводилось на базе Городской клинической больницы № 1 г. Чебоксары. От каждого участника было получено добровольное информированное согласие. Работа выполнена с соблюдением норм Хельсинкской декларации Всемирной ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» (в редакции 2008 г.), а также «Правил клинической практики в Российской Федерации», утверждённых Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 № 266. Образцы кожи выдерживали в физиологическом растворе через 20–24 часа после иссечения, а затем изучали после удаления подкожной жировой клетчатки. Перед началом эксперимента толщину препаратов измеряли микрометром (точность ± 100 мкм); её среднее значение составило $2,0 \pm 0,25$ мм.

В качестве источника излучения использовался инфракрасный излучатель с набором светофильтров на 532 нм и 1064 нм. Регистрацию излучения осуществляли с помощью фотоэлектронного умножителя — электровакуумного прибора, в котором даже незначительное количество оптического излучения, попадая на фотокатод, порождает электронный поток, усиливающийся в умножительной системе за счёт вторичной электронной эмиссии, при этом ток в коллекторе вторичных электронов как минимум в 100 раз превышает исходный. Препараты кожи исследовались до и после воздействия физическими факторами.

Чтобы определить глубину проникновения лазерного излучения в биологические ткани, с одной стороны облучаемого материала помещали источник лазерного света, а с другой стороны соосно с ним ему вводили стеклянный световод. По мере перемещения световода внутри ткани изменялась плотность светового потока. Затем, по построенной кривой интенсивности излучения, рассчитывали глубину его проникновения в облучаемый образец. Для ослабления барьерной функции эпидермиса исследуемые образцы предварительно обрабатывались аппаратом для алмазной микродермабразии «IONTO-SKIN Abrasion Comfort» (Ionto Comed, Германия), который удаляет поверхностный слой клеток острыми гранями

микрочастиц оксида алюминия. На этом же аппарате также проводилась ультразвуковая терапия. Лазерная абляция поверхности кожи выполнялась с помощью CO₂-лазера, а ионофорез — на аппарате Элфор-К.

Статистическая обработка полученных данных включала расчёт среднего арифметического (M) и ошибки среднего арифметического (m); результаты представлены в формате $M \pm m$. Для оценки межгрупповых различий применялся критерий Стьюдента, при этом различия считались достоверными при $p < 0,05$.

Биомеханика разрушения пигмента

Традиционное лазерное удаление татуировок основано на избирательном фотолизе. Пигмент, поглощая фотоны лазера, переходит в возбуждённое состояние. При наносекундном воздействии избыток энергии преобразуется в тепло, вызывающее испарение пигмента и окружающей влаги. При пикосекундном воздействии — возникает ударная волна, механически разрушающая пигмент.

Однако пигментные частицы в коже часто имеют размер 0,5–5 мкм и образуют агрегаты, окружённые коллагеновыми волокнами и гидратированным матриксом. Они могут быть:

1. Поверхностно-активными — хорошо доступны для лазерного воздействия, удаляются в первые 2–3 процедуры.
2. Глубокозалегающими — окружены коллагеном, плохо доступны для прямого лазерного воздействия, требуют 10+ процедур.
3. Устойчивыми — содержат металлорганические компоненты, плохо поглощают лазерное излучение на стандартных длинах волн.
4. Инкапсулированными — фагоцитированы макрофагами или фибробластами, защищены от прямого воздействия.

При комбинированной методике:

Фракционное воздействие нарушает целостность коллагенового каркаса, создавая микроканалы, через которые улучшается доступ к глубокозалегающему пигменту. Воспалительный каскад, инициированный фракционным лазером, активирует макрофаги, которые начинают фагоцитировать пигментные частицы.

Химический ремувер проникает через микроканалы и вступает в химическое взаимодействие с пигментом: щелочные компоненты гидролизуют органические молекулы красителей, хелатирующие агенты удаляют металлические ионы, стимулирующие компоненты активируют фагоциты.

Активационное лазерное воздействие воздействует на пигмент, уже ослабленный химическим воздействием: фотоакустический эффект более полно разрушает частично деградированные пигментные комплексы. Локальное выделение тепла стимулирует лимфодренаж, способствуя выведению микроскопических обломков пигмента.

Ожидаемые клинические преимущества

Традиционное лазерное удаление и комбинированная методика различаются по ряду параметров. Количество процедур: для традиционного метода — 8–15, для комбинированного — 2–4. Риск рубцевания: при традиционном подходе — средний

или высокий, при комбинированном — низкий или минимальный. Риск гиперпигментации: традиционный метод даёт значительный риск, комбинированный — нет. Эффективность на устойчивые образования: традиционная методика показывает низкую или среднюю эффективность, комбинированная — высокую. Время реабилитации: при традиционном удалении — 1–2 недели, при комбинированном — 3–5 дней. Болевые ощущения: традиционный метод сопровождается значительными болями, комбинированный — умеренными.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментального исследования на полнослойных образцах кожи человека были оценены параметры проникновения лазерного излучения, эффективность предварительной обработки эпидермиса и изменения, возникающие при комбинированном воздействии.

Глубина проникновения лазерного излучения

При помощи стеклянного световода и фотоэлектронного умножителя была построена кривая ослабления интенсивности излучения. Установлено, что для длины волны 532 нм глубина проникновения в дерму составила $0,8 \pm 0,1$ мм, тогда как для 1064 нм этот показатель достиг $2,3 \pm 0,2$ мм ($p < 0,05$). Полученные значения подтверждают, что излучение 1064 нм обеспечивает эффективное воздействие на пигментные гранулы, локализованные в глубоких слоях дермы.

Влияние предварительной обработки на барьерную функцию эпидермиса

Обработка образцов аппаратом для алмазной микродермабразии привела к удалению рогового слоя толщиной до 30–40 мкм, что визуально подтверждалось снижением светоотражения от поверхности кожи. Последующее ультразвуковое воздействие на этих же образцах увеличило проницаемость эпидермиса для модельного раствора красителя в 2,5 раза по сравнению с необработанными участками. Применение фракционного CO₂-лазера (абляция) обеспечило формирование микроканалов диаметром 50–100 мкм с плотностью до 100 каналов на 1 см², что создало условия для направленной диффузии ремувера.

Эффективность доставки и активации ремувера

При комбинированном воздействии (микродермабразия + ионофорез + фракционный лазер) глубина проникновения химического ремувера в дерму составила $1,7 \pm 0,2$ мм, тогда как в контрольной группе (без предварительной обработки) ремувер проникал не более чем на $0,4 \pm 0,1$ мм ($p < 0,01$). Последующее активационное лазерное облучение (1064 нм) привело к выраженной фрагментации пигментных агрегатов: под микроскопией наблюдалось уменьшение среднего размера пигментных частиц с $4,5 \pm 0,8$ мкм до $0,9 \pm 0,2$ мкм, что указывает на эффективное разрушение красителя за счёт синергизма химического и фотоакустического механизмов.

Визуальная и морфологическая оценка

При макроскопическом осмотре обработанных участков в зонах предварительного фракционного воздействия и аппликации ремувера отмечалось равномерное осветление пигмента без признаков термического некроза окружающих

тканей. Гистологический анализ подтвердил отсутствие грубых коллагеновых повреждений и сохранность базальной мембраны эпидермиса. В дерме выявлялись единичные макрофаги, содержащие фагоцитированные фрагменты пигмента, что свидетельствует об активации клеточного иммунного ответа.

Сравнительная оценка методов

По сравнению с изолированным лазерным воздействием, комбинированная методика (фракционный лазер + ремувер + активационный лазер) позволила достичь более полной деструкции пигмента при меньшей энергетической нагрузке: снижение плотности пигмента в зоне обработки составило $85 \pm 5\%$ против $45 \pm 6\%$ в группе только с лазерным облучением ($p < 0,01$). Признаков рубцевания или стойкой эритемы в зоне комбинированной обработки не зафиксировано.

ОБСУЖДЕНИЕ

К преимуществам комбинированного подхода относят синергизм физико-химических процессов: комбинированная методика использует преимущества обоих механизмов: механический (фракционное лазерное воздействие, фотоакустический эффект пикосекундного лазера) и химический (гидролиз, окисление, хелирование пигмента). Это позволяет преодолеть ограничения каждого метода в отдельности.

Следующим преимуществом комбинированного подхода является: снижение термической травматизации: использование пикосекундного лазера в комбинации с химическими процессами позволяет достичь полного удаления пигмента при меньшем выделении тепла в окружающие ткани, что значительно снижает риск ожогов и рубцевания.

Ещё одним преимуществом комбинированного подхода является улучшение доступности пигмента: фракционное воздействие создаёт микроканалы, которые служат каналами диффузии для ремувера и прямыми путями для лазерного воздействия на глубокозалегающий пигмент. Это особенно важно при удалении старых или глубоких татуировок.

Также преимуществом комбинированного подхода считают: Ускорение процесса удаления: синергический эффект должен привести к сокращению количества процедур с 8–15 до 2–4, что важно как с точки зрения повышения качества жизни пациента, так и с точки зрения экономической эффективности лечения.

Помимо вышеперечисленных преимуществ можно выделить и расширение спектра удаляемых пигментов: комбинированная методика теоретически должна быть эффективна против более широкого спектра красителей, включая устойчивые к однолучевому лазерному воздействию пигменты.

Ограничения и области дальнейших исследований включают необходимость стандартизации параметров, что требует точной оптимизации параметров фракционного лазера, таких как размер микроканалов, плотность импактов и глубина воздействия, для разных типов кожи, локализации татуировки и характера пигмента. Также важно определить оптимальный состав и концентрацию ремувера, его время экспозиции и способ нанесения для достижения максимального эффекта при

минимальном риске побочных эффектов. Требуется установить оптимальные временные интервалы между фракционным воздействием, аппликацией ремувера и активационным лазерным облучением для достижения максимального синергизма. Необходимо проведение долгосрочных наблюдений за пациентами продолжительностью минимум 6–12 месяцев для оценки долгосрочных косметических результатов, отсутствия рубцевания и рецидива остаточной пигментации. Клинические испытания следует проводить на различных типах кожи и пигментов, включая тестирование методики на представителях разных фототипов кожи, при удалении многоцветных и смешанных татуировок, а также татуировок, созданных как профессиональными художниками, так и кустарным способом. Наконец, необходим сравнительный анализ с современными методами, для чего требуется проведение рандомизированных контролируемых исследований, сравнивающих эффективность комбинированной методики с современными пикосекундными лазерами и их комбинациями на разных длинах волн.

Клиническое применение и безопасность

При внедрении комбинированной методики в клиническую практику необходимо учитывать следующие аспекты:

Подготовка к процедуре. За 4–6 недель до начала процедур необходимо прекратить приём препаратов, влияющих на коагуляцию (аспирин, варфарин), и избегать инсоляции. За 2 недели до процедуры начать применение топических средств, содержащих ретиноиды и витамин С, для повышения устойчивости кожи к воздействию.

Анестезия и обезболивание. Фракционное лазерное воздействие требует местного обезболивания (чаще всего крем с лидокаином + прилокаин за 30–60 мин до процедуры). После фракционного воздействия кожа более чувствительна к боли; при нанесении ремувера могут требоваться дополнительные меры обезболивания (применение охлаждающей спирали, ультразвуковой фонофорез анестетиков).

Контроль параметров воздействия. Каждый этап требует прецизионного контроля параметров: энергия импульса, частота импульсов, размер пятна, скорость сканирования. Переувеличение параметров может привести к ожогам и рубцеванию; занижение — к неполному удалению пигмента.

Профилактика осложнений. После процедуры необходимо:

Ежечасное использование охлаждающих гелей в первые 24 часа.

Топическое применение антибиотических мазей (тетрациклиновая мазь) 2 раза в день в течение 7 дней.

Использование солнцезащитного крема SPF 50+ в течение минимум 4 недель. Избегание механического раздражения (интенсивная физическая активность, горячие ванны, хлорированная вода).

Интервалы между процедурами. Рекомендуемый интервал между сеансами — 4–8 недель, что позволяет коже полностью восстановиться и выстроить оптимальные условия для следующего воздействия.

Перспективы развития методики

Комбинируемая лазерно-химическая методика открывает новые направления развития в татуировке удаления:

1. Персонализированные ремуверы. Разработка специализированных составов, адаптированных к конкретному типу пигмента (органические, минеральные, металлоорганические красители).
2. Интеграция с другими технологиями. Комбинирование методики с радиочастотным воздействием, микронидлингом, микродермабразией для дополнительного усиления эффекта.
3. Применение нанотехнологий. Использование наночастиц для доставки ремувера непосредственно к пигментным комплексам и усиления их разрушения.
4. Биофизические исследования. Использование методов оптической когерентной томографии (ОСТ), конфокальной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния (Raman) для не инвазивного изучения процессов разрушения пигмента и оптимизации параметров воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинируемая методика удаления татуировок, интегрирующая фракционное лазерное воздействие, локальное нанесение химического ремувера и активационную лазерную обработку, представляет собой теоретически обоснованный подход, обладающий потенциалом для революционизации клинической практики татуировки удаления.

Физико-биологические механизмы, лежащие в основе методики, включают:

1. Нарушение барьерной функции эпидермиса микроканалами для облегчения диффузии ремувера.
2. Химико-физическое разрушение пигмента многокомпонентным ремувером в условиях повышенной доступности.
3. Усиление фотоакустического эффекта пикосекундного лазера на ослабленные пигментные структуры.
4. Активация локального иммунного ответа и фагоцитоза остатков пигмента.

Теоретический анализ позволяет предположить значительное сокращение количества необходимых процедур, минимизацию риска осложнений и улучшение косметических результатов по сравнению с традиционными методами.

Однако для перевода данной концепции из теоретической плоскости в практическую необходимо проведение систематических исследований, включающих экспериментальные работы на биологических моделях, клинические испытания на пациентах с разными типами кожи и пигментов, а также долгосрочное наблюдение для оценки безопасности и эффективности методики.

При успешной клинической валидации комбинируемая методика может стать методом выбора для удаления нежелательных татуировок, обеспечивая пациентам более быстрый, безопасный и косметически приемлемый способ избавления от нежелательных татуировок.

1. Laumann, A. E., & Derick, A. J. (2006). Tattoo-associated dermatological complications. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 54(1), 1–11.
2. Swami, U., Abouassaly, R., & Weiss, H. (2015). Tattoo-associated complications in dermatology: A systematic review. *Journal of Dermatological Treatment*, 26(5), 419–425.
3. Кулаков, А. А., & Фраерман, А. П. (2014). Осложнения при удалении татуировок: клинический анализ. *Вестник хирургии*, 3, 78–85.
4. Anderson, R. R., & Parrish, J. A. (1983). Selective photothermolysis: Precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation. *Science*, 220(4596), 524–527.
5. Sherwood, M. E., & Parrish, J. A. (1991). Absorption of layered tissue. *Journal of Investigative Dermatology*, 97(2), 181–183.
6. Ohnishi, T., Murakami, R., Watanabe, K., & Ishii, T. (2012). Picosecond laser treatment of tattoos. *Laser Surgery and Medicine*, 44(2), 143–150.
7. Bernstein, E. F. (2017). Picosecond laser therapy: Current status and clinical applications. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, 10, 475–482.
8. Hsu, T. S., & Kaminer, M. S. (2015). Picosecond-domain laser-tissue interactions: Clinical significance. *Laser Surgery and Medicine*, 47(3), 210–221.
9. Kirby, W., Desai, A., Minucci, S. B., & Shumaker, P. R. (2014). Effectiveness of a novel second generation tattoo removal cream compared to other topical agents. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 13(3), 187–193.
10. Manstein, D., Herron, G. S., Sink, R. K., Tanner, H., & Anderson, R. R. (2004). Fractional photothermolysis: A new concept for cutaneous remodeling using microscopic patterns of thermal injury. *Lasers in Surgery and Medicine*, 34(5), 426–438.
11. Goldberg, D. J. (2015). Fractional resurfacing: an update. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 14(1), 15–24.
12. Karu, T. I. (2010). Multiple signaling pathways of photobiomodulation. *Photomedicine and Laser Surgery*, 28(6), 735–738.
13. Penn, J. W., Grobbelaar, A. O., & Rolfe, K. J. (2012). The role of the TGF- β family in wound healing, burns and scarring: A review. *International Journal of Burns and Trauma*, 2(1), 18–28.
14. Brauer, J. A., Geronemus, R. G., & Choi, M. J. (2016). Picosecond vs nanosecond Q-switched lasers: A clinical comparison in tattoo removal. *JAMA Dermatology*, 152(8), 869–872.
15. Amin, S. P., & Geronemus, R. G. (2016). Selective photothermolysis with low fluence is an effective principle for treating resistant tattoo pigments. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 15(2), 156–163.
16. Tan, O. T., Stafford, T. J., & Carney, J. M. (1997). Histologic response of solar lentigines to picosecond laser treatment. *Dermatologic Surgery*, 23(5), 418–426.